ANNÉE 1961
N° D'ORDRE : 61

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR L'OBTENTION

DU TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Louis ANDRÉ
INGÉNIEUR E.N.S.A.T.
LICENCIÉ ÈS SCIENCES

1re THESE. — RECHERCHE SUR LA PHYTOTOXICITE DU CUIVRE DANS CERTAINS SOLS DÉGRADÉS.

2e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 22 Décembre 1961, devant la Commission d'Examen

M. DIEHL, *Président*
M. RIVALS
Mlle BERDUCOU } *Examinateurs*
M. LACROIX

TOULOUSE
Imprimerie A. GOMÈS
96, BOULEVARD JEAN-BRUNHES

Année 1961
N° d'ordre : 61

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR L'OBTENTION

DU TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Louis ANDRÉ
INGÉNIEUR E.N.S.A.T.
LICENCIÉ ÈS SCIENCES

1re THESE. — RECHERCHE SUR LA PHYTOTOXICITE DU CUIVRE DANS CERTAINS SOLS DÉGRADÉS.

2e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 22 Décembre 1961, devant la Commission d'Examen

M. DIEHL, *Président*
M. RIVALS
Mlle BERDUCOU } *Examinateurs*
M. LACROIX

TOULOUSE
Imprimerie A. GOMÈS
96, BOULEVARD JEAN-BRUNHES

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

FACULTÉ DES SCIENCES

TABLEAU DU PERSONNEL

ADMINISTRATION

MM.	DURAND. . . .	Doyen.
	COMBES. . . .	Assesseur.

HONORARIAT

MM.	CAMICHEL. . .	Professeur honoraire. Membre de l'Institut.
	CAPDECOMME. .	Doyen honoraire. Recteur honoraire.
	CHALAUD. . .	Professur honoraire.
	DELTHEIL. . .	Recteur honoraire. Doyen honoraire. Professeur honoraire.
	DUPOUY. . . .	Doyen honoraire. Membre de l'Institut. Directeur général honoraire du C.N.R.S.
	FOUCHÉ. . . .	Professeur honoraire.
	GAUSSEN. . .	Professeur honoraire. Correspondant de l'Institut.
	JACQUES. . . .	Professeur honoraire.
	MIGNONAC. . .	Professeur honoraire.

PROFESSEURS

MM.	VANDEL. . . .	Zoologie. Membre de l'Institut.
	CATHALA. . .	Chimie Physique et Electrochimie.
	ESCANDE. . .	Mécanique des Fluides. Membre de l'Institut.
	DUPOUY. . . .	Physique. Membre de l'Institut.
	CASTÉRAS. . .	Géologie.
	BEDOS.	Chimie.
	CAPDECOMME. .	Minéralogie.
	DUPIN.	Radioélectricité.
	TEISSIÉ-SOLIER	Electrotechnique.
	NOUVEL. . . .	Biologie générale.
	GALLAIS. . . .	Chimie.
	DURAND. . . .	Physique.
	FERT.	Physique.
	DIEHL.	Agronomie.
	COMBES. . . .	Calcul différentiel et intégral.
	LESBRE. . . .	Chimie organique.
	BLAIZOT. . .	Physiologie.
	BRUNEL. . . .	Physiologie végétale.
	MORQUER. . .	Cryptogamie.
	HURON. . . .	Mathématiques appliquées.
	MARGULIS. . .	Pédologie.
	TRICHE. . . .	Chimie analytique et Spectrographie.
	PASQUALINI. .	Mathématiques.
	LEDOUX. . . .	Zoologie appliquée.
	RIVALS. . . .	Agriculture.
	PERRIER. . . .	Physique.
	MATHIS. . . .	Chimie.
	ORLIAC. . . .	Géochimie et Minéralogie.
	LAFOURCADE. .	Physique.
	ANGELIER. . .	Zoologie.
Mlle	DE FERRE. . .	Botanique.
MM.	FARRAN. . . .	Minéralogie et Géotechnique.
	LAUDET. . . .	Physique théorique et Calcul numérique.
	SERFATY. . .	Biologie animale.
	NOUGARO. . .	Hydraulique générale et appliquée. . . . .
	LAGASSE. . . .	Electrotechnique.
	GARDY.	Génie chimique.
	BLANC.	Physique nucléaire.
	BIREBENT. . .	Electronique appliquée.
	VOIGT.	Chimie minérale.
	LEREDDE. . . .	Botanique.
	LELUBRE. . . .	Géologie.
	TROCHAIN. . .	Botanique.
	GOUYON. . . .	Mécanique rationnelle et appliquée.
	BAYET.	Physique.
	MASDUPUY. . .	Chimie propédeutique.
	LALAGUE. . . .	Mathématiques générales.
	DESSENS. . . .	Physique du Globe.
	BOUIGUE. . . .	Astronomie.
	COUCHET. . . .	Physique.
	LEJEUNE. . . .	Chimie.
	LASCOMBES. . .	Botanique.
	ASSELINEAU. . .	Chimie biologique.
	MAURET. . . .	Chimie systématique.
	GUMOWSKI. . .	Professeur associé.

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	LACROIX. . . .	Techniques agricoles.
	HAMANT. . . .	Botanique.
Mme	BRUNEL. . . .	Physiologie végétale.
M.	GAUTIER. . . .	Physique propédeutique.
Mlle	BERDUCOU. . .	Physiologie végétale.
MM.	MARONI.	Chimie.
	SECONDAT. . .	Zootechnie et Hydrobiologie appliquée.
	MIQUEL.	Chimie propédeutique.
	RAYNAUD P. . .	Physiologie animale.
	PICCA.	Physique.
	PULOU.	Minéralogie.
	LACOSTE. . . .	Electrotechnique.
	AGID.	Physiologie.

MAITRES DE CONFÉRENCES

MM.	BLANCHARD. . .	Mathématiques.
	MÉRIC.	Mathématiques appliquées.
	COLIN.	Physique.
	BEETSCHEN. . .	Biologie générale.
	MONTEL.	Chimie.
	COULON.	Physique industrielle.
	REY.	Botanique.
	CRUMEYROLLE.	Mathématiques.
	JOURDHEUIL. . .	Zoologie.
	BUGAREL. . . .	Génie chimique.
	CAMBOU.	Physique.
	MEDIONI. . . .	Psychophysiologie comparée.
	COULOMB. . . .	Physique.
	MASCART. . . .	Mathématiques.
	POMMIEZ. . . .	Mathématiques générales.
	SEVELY.	Physique industrielle appliquée.
	THIRRIOT. . . .	Mécanique des Fluides.
M.	DAVID.	Physique.
Mme	LECAL.	Zoologie.
M.	MIROUSE. . . .	Géologie.
Mlle	LAPEYRE. . . .	Mathématiques.
MM.	DAT.	Mécanique des Fluides.
	PILOD.	Physique.
	LARROQUE. . . .	Physique.
	BARRANS. . . .	Chimie.
	ZALTA.	Chimie biologique.
	JEANNIN. . . .	Chimie minérale.

CHARGÉS D'ENSEIGNEMENT

MM.	BOURSIN. . . .	Mathématiques.
	CEA.	Mathématiques M.P.C.
	THÉNOZ. . . .	Minéralogie et Géotechnie.

SECRÉTARIAT

M.	ARGILAS. . . .	Conseiller Administratif des Services Universitaires.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548920_0104

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de Chimie Agricole de l'E.N.S. Agronomique sous la constante et bienveillante direction de mon maître, Monsieur le professeur Lacroix. Qu'il trouve ici l'hommage de mon dévoué et respectueux attachement et mes remerciements sincères pour les enseignements précieux qu'il ne cesse de me prodiguer.

Je remercie Monsieur le professeur Diehl, directeur de l'E.N.S. Agronomique pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Je remercie également M^lle^ Berducou et M. Rivals, professeurs à la Faculté des Sciences, pour l'amabilité avec laquelle ils ont accepté de juger ce travail.

A mon ami Jean Girod, qui nous a prématurément quitté, je tiens à rendre un hommage pour l'aide sans mesures et les encouragements qu'il m'a prodigués au cours de mes recherches. Ce travail est un peu de son œuvre. Son souvenir y restera à jamais attaché.

INTRODUCTION

La culture de la vigne occupe encore une place importante dans l'économie agricole du Sud-Ouest de la France, malgré une réduction dans l'étendue du vignoble, depuis l'invasion du phylloxera.

Le régime des exploitations agricoles, notamment celles situées dans la moyenne vallée de la Garonne, est encore la polyculture bien qu'une certaine spécialisation semble se préciser, grâce au progrès de la mécanisation. Il en résulte que la plupart des exploitations possèdent leur vignoble particulier, tandis que certaines d'entre elles pour des raisons de terroir ou d'infertilité sont axées plus spécialement sur cette culture.

Après le défrichement des vignobles, dans ces terrains d'alluvions, la réintégration de ces parcelles dans l'assolement pose parfois de très graves problèmes. Les plantes se développent très mal et les accidents observés sont tels que dans certains cas, le sol est rendu improductif pour de nombreuses années.

Depuis fort longtemps des chercheurs se sont préoccupés de connaître les effets sur la végétation des composés cupriques apportés au sol lors des traitements antiparasitaires de la vigne.

P. Viala, en 1894, publiait dans « la Revue de Viticulture » [1] un compte rendu de ses expériences, au cours desquelles un apport important de cuivre, sous forme de SO_4Cu, à la dose de 200 g par pot contenant 15 kg de terre, n'affectait en rien la vitalité des plants de vigne qui s'y développaient normalement. « Le sol était constitué par une terre de jardin, très riche, siliceuse, et très peu calcaire. »

Ceci suppose par conséquent, un taux élevé de matière organique. La présence de calcaire, même en faible quantité, assure au sol une réaction neutre ou légèrement basique. Nous verrons par la suite l'influence de ces deux facteurs sur le comportement du cuivre dans le sol.

A. Girard, dans un compte rendu à l'Académie des Sciences [2] arrive aux mêmes conclusions que P. Viala. Il montre que de fortes doses de cuivre, apportées au sol sous forme de sulfate neutralisé par des « cristaux de soude », sont sans effets sur la végétation. Il ne donne malheureusement aucune indication sur la nature du sol utilisé dans ses essais.

En 1928 L. Rives, professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse, publiait dans le « Journal d'Agriculture pratique » un article consacré à ce problème et intitulé « Sur un cas de fatigue du

sol. La maladie des céréales semées sur défrichement de vigne » [3]. Dans cet article l'auteur émet l'hypothèse d'une toxicité due à des produits de décomposition des racines de vigne.

Depuis lors, dans différentes régions cette question a fait l'objet de nombreux travaux tels ceux de Drouineau à Antibes [4] et Depardon et Buron à Blois [5].

A notre connaissance ces accidents observés à la suite du défrichement de vieux vignobles, se produisent toujours dans les sols d'alluvions dits « boulbènes », déposés par la Garonne, ainsi que dans la basse vallée du Tarn. Nos observations se sont limitées à la région Toulousaine, mais il est probable que des phénomènes analogues s'observeraient depuis la Basse Ariège, ancien vignoble d'Eaunes, jusque dans la région des Graves.

Nous avons été amenés à étudier ces phénomènes, à la suite du défrichement en 1955 d'une vieille vigne de « vinifera», située sur le domaine de Monlon, ferme expérimentale de l'E.N.S.A.T. Deux parcelles situées côte à côte sur la 5e terrasse, en bordure de la 4e, l'une composée de v. *vinifera*, l'autre d'hybrides producteurs directs, étaient défrichées au cours de l'hiver 1954-1955. Pendant l'année 1955, on effectuait les travaux aratoires nécessaires pour une bonne préparation du sol, et on apportait des fumures organiques et minérales, de l'ordre de 40 t de fumier et 600 kg de scories potassiques par hectare, avant le semis d'un mélange blé-vesce.

Alors que sur la parcelle ayant porté les plants d'hybrides la végétation était normale, sur l'autre partie anciennement en *V. vinifera*, on constatait un retard considérable dans le développement après les premiers stades de la germination, suivi du dépérissement progressif de toutes les plantes.

La bonne préparation du sol, les fumures organiques et minérales abondantes, amenaient à penser que ces accidents étaient liés à la présence sur le même terrain pendant de nombreuses années des plants de *V. vinifera*.

Plus récemment, toujours à Monlon, de nouveaux défrichements de vigne ont permis de faire les mêmes observations.

***

Nous avons donc été conduits, après une observation attentive des symptômes présentés par les plantes, à faire l'étude physico-chimique des sols sur lesquels apparaissent ces accidents : ceci fait l'objet des deux premiers chapitres de ce travail.

Les méthodes et techniques de dosage du cuivre sont exposées dans le troisième chapitre.

L'étude du comportement du cuivre dans le sol et de son influence sur la biologie de la plante est abordée dans le quatrième chapitre tandis que le cinquième est consacré plus spécialement à la démonstration de sa toxicité.

Les conditions de la phytotoxicité du cuivre dans le sol, ainsi que les résultats d'une expérimentation au champ sont exposés dans le sixième chapitre.

Avant de conclure, nous envisageons succinctement dans le dernier chapitre quelques projets pour la restauration de ces sols dégradés riches en cuivre assimilable.

CHAPITRE I

COMPORTEMENT DES PLANTES APRÈS DÉFRICHEMENT DE VIEILLES VIGNES

Nous avons fait de nombreuses observations dans la région Toulousaine, mais notre étude portera plus spécialement sur la parcelle présentée en introduction. Appartenant au domaine de l'E.N.S.A.T., toutes facilités nous étaient accordées, aussi bien pour nos observations que pour une expérimentation au champ.

La parcelle envisagée à une superficie de 1,2 ha environ. Elle est située sur la 5e terrasse de la Garonne, mais en bordure de la IVe et orientée Est-Ouest perpendiculairement à leur limite (voir figure 1). Les marnes miocènes sur lesquelles reposent les alluvions, forment une couche imperméable et dans la zone de passage entre les deux terrasses les sources sont fréquentes. C'est le cas pour la parcelle envisagée où une zone constamment humide indique l'émergence d'une source soulignée d'ailleurs par la présence d'un fossé de drainage.

Affectée primitivement à la culture maraîchère, ce qui laisse supposer une fertilité convenable du sol à cette époque, on y établit un vignoble constitué de *Vitis vinifera* L. aux environs de 1880. Arraché au cours de l'hiver 1954-1955, il est donc resté 75 ans sur le même emplacement. Après son défrichement, malgré tous les soins apportés à la préparation du sol et à sa fumure organique et minérale, la végétation fut extrêmement réduite.

Le semis d'un mélange Vesce-Blé, ce dernier servant de tuteur, à l'entrée de l'hiver, eût à supporter les froids rigoureux de février 1956. A la reprise de la végétation, les plantules survivantes présentèrent des symptômes caractéristiques que nous allons étudier.

En général, la morphologie des tiges et des feuilles de blé (Étoile de Choisy) est peu affectée. On observe seulement un retard dans le développement au cours des premiers stades de végétation, rendu sensible par comparaison avec des plantules témoins. C'est ce que nous avons pu constater, grâce à la présence dans la parcelle contiguë anciennement plantée en vigne « d'hybrides producteurs

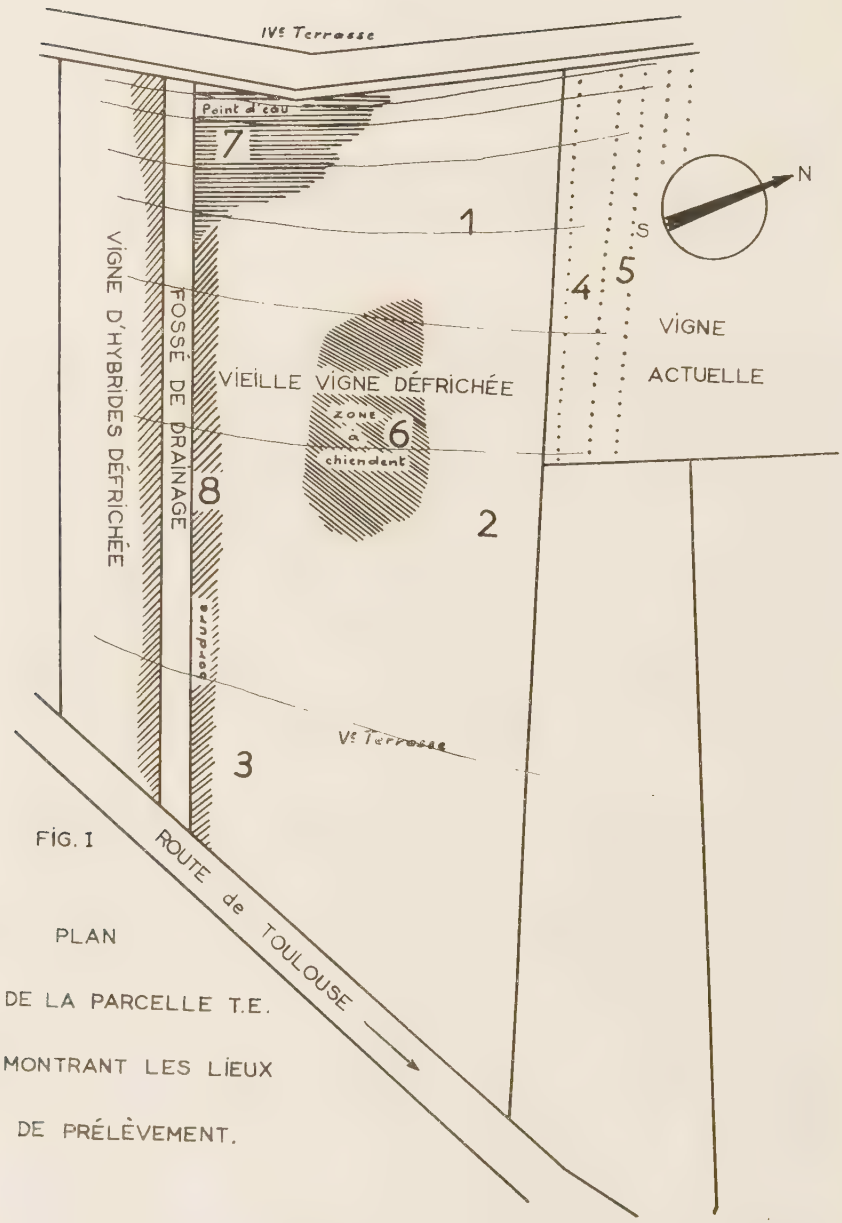


FIG. I

PLAN

DE LA PARCELLE T.E.

MONTRANT LES LIEUX

DE PRÉLÈVEMENT.

directs » d'une végétation normale du blé. Les semis ayant été effectués à la même date, les plantules de blé, servant de témoins commençaient leur tallage, tandis que dans la parcelle provenant du défrichement de la vieille vigne, le blé était encore au stade 3 à 4 feuilles. Ce nanisme, déjà signalé par Drouineau [4] s'observera durant toute la vie des plantes, et l'épiaison, pour celles qui y parviendront, s'effectuera à moins d'une vingtaine de centimètres au-dessus du sol avec tallage toujours nul. De plus, la quasi-totalité des épis formés seront attaqués par le Charbon (Ustilago tritici) tandis que d'autres maladies crytogamiques attaqueront feuilles et tiges du végétal carencé.

Au cours des premiers stades suivant la germination, la tige, et plus tard les feuilles âgées, prennent une teinte rougeâtre semblant traduire un déséquilibre physiologique.

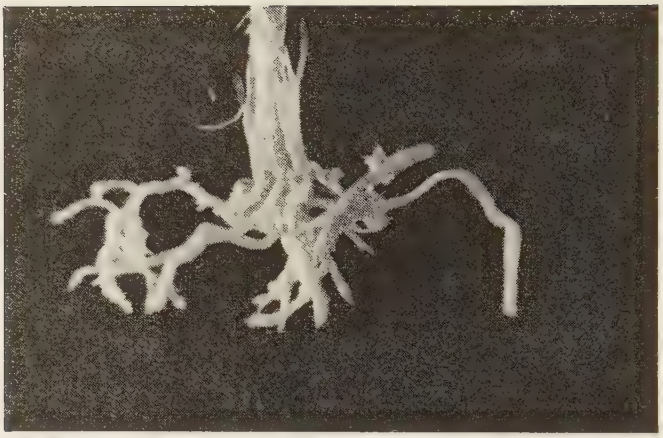
Si l'aspect extérieur de la plante dans les premiers stades du développement, mis à part la teinte rougeâtre des feuilles âgées et le nanisme des plantules n'apporte guère de renseignements sur les causes du dépérissement, l'examen du système radiculaire est particulièrement fructueux. Ce dernier est singulièrement réduit. Au lieu de leur disposition fasciculée classique, les racines de blé sont courtes, ne dépassant guère 2 cm de longueur, coralloïdes, brunes, épaissies, à extrémités souvent renflées (photo 1). Leur nombre est parfois considérable, et comme elles sont très courtes, le système radiculaire prend alors un aspect buissonnant.

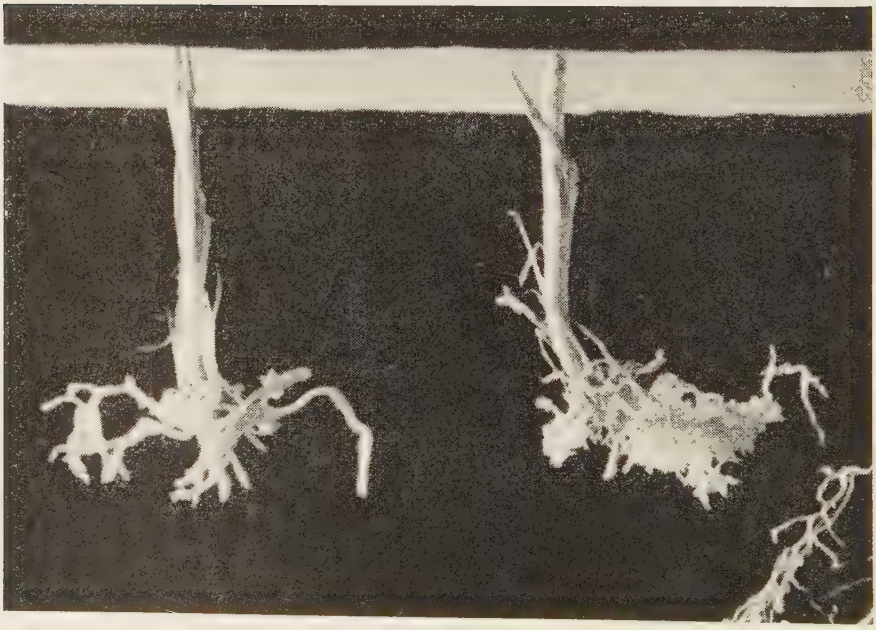
Au printemps 1956, une expérimentation, conduite dans des pots en zinc paraffinés, contenant environ 11 kg de terre en provenance de la parcelle stérile, nous a permis d'observer le comportement du blé de la germination à l'épiaison. Les symtômes observés furent identiques à ceux décrits au champ. Le pourcentage de germination fut normal mais le développement très lent, et le tallage nul. A l'épiaison, les blés ne dépassaient guère 20 cm de hauteur, et les épis presque vides ne contenaient qu'un ou deux grains d'une « maigreur » extrême. Le système radiculaire présentait les mêmes accidents que ceux que nous avons décrits précédemment.

Nous avons constaté que la réponse des plantes à la fumure azotée sous forme de NO_3NH_4, était à peu près nulle.

Les vesces, semées en mélange avec le blé disparurent plus rapidement que ce dernier. Les tiges et les feuilles prirent une teinte rougeâtre et les plantules, de plus en plus souffreteuses finirent par mourir. Le système radiculaire, profondément affecté, présentait les mêmes symptômes de dégénérescence que celui du blé, et de plus, ne portait aucune traces de nodosités.

Au cours de l'été, la surface du sol était presque nue. Seules, quelques rares plantes spontanées purent s'y maintenir. Tel fut le cas de l' « Erigeron canadensis » L. et de « Matricaria chamomilla »





Photos n° 1

Aspect radiculaire des plantules de blé intoxiquées.

L. Cependant, leur système radiculaire était fortement anormal et présentait les symptômes classiques des autres plantes cultivées. Ce n'est qu'en raison de leur grande rusticité, notamment leur résistance à la sécheresse, que leur développement fut possible.

Les dernières espèces à disparaître sont le Raygrass d'Italie, le trèfle blanc, et le chiendent (Cynodon dactylon).

VARIATIONS DANS LA RÉPARTITION DES SYMPTOMES

Les phénomènes décrits affectent pratiquement la majeure partie de la parcelle. On peut cependant y distinguer 3 autres zones où la gravité des symptômes va en décroissant :

1° Une zone située au bas de la pente, notée (6) sur la fig. 1, à peu près au centre de la parcelle et correspondant à une surface autrefois envahie par le chiendent (Cynodon dactylon). La végétation y est souffreteuse; on y retrouve encore les symptômes morbides observés sur le reste de la parcelle, mais d'un caractère moins accusé. Les vesces ont pu s'y maintenir, et l'établissement de la végétation spontanée a été possible;

2° Une zone constamment humide à la partie supérieure de la parcelle, côté ouest (7). Le développement du blé et des vesces y est à peu près normal;

3° La bordure de l'ancienne vigne côté fossé (8). Les plantes y présentent un développement quasi normal comparable à celui des parcelles voisines.

A la fin du printemps, la parcelle présente un aspect sub-désertique. Seuls quelques pieds de blé prennent, de-ci de-là, un développement notable. L'examen de ces plantes montre que le système radiculaire, localisé dans une « motte » de fumier a trouvé là un milieu convenable pour son développement et les matières nutritives nécessaires à l'alimentation du végétal. On remarque dans ce cas, que l'espace occupé par le système radiculaire est strictement limité au contour de la « motte » de fumier. A la périphérie, dès que les racines entrent en contact avec le sol, leur croissance est arrêtée net et on observe alors les symptômes classiques précédemment décrits.

CHAPITRE II

ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS DÉGRADÉS
APERÇU GÉOGRAPHIQUE

Ces accidents se rencontrent sur les sols formés à partir d'alluvions récentes, d'âge quaternaire, tels que ceux de la moyenne vallée de la Garonne, de la basse vallée du Tarn ou de leurs affluents. Leur disposition en terrasses successives a attiré depuis longtemps l'attention des géologues, Leymerie, Marle, Chaput, Denizot. Ils se sont plus particulièrement attachés à étudier les processus qui ont aboutit à la formation de ces vastes étendues sub-horizontales. Nous ne les envisagerons pas dans ce travail.

Il convient cependant de signaler l'importance des surfaces mises en jeu. Au sortir des Petites Pyrénées, en aval de Boussens, la vallée de la Garonne, orientée N.-NE s'élargit considérablement pour donner à Toulouse des alluvions s'étendant sur plus de 20 km de large. Le lit du fleuve s'appuie à l'Est sur les mollasses oligocènes du Lauraguais et les alluvions qui reposent sur ce même substrat se développent essentiellement vers l'Ouest en terrasses superposées, nettement séparées entre elles par un talus sensiblement parallèle au lit majeur. Les affluents de la Garonne ont entaillé ces terrasses et mis à nu le substrat molassique, lequel affleure aussi par places à la faveur de l'érosion.

A la hauteur de Toulouse, on peut distinguer six niveaux successifs. D'après Denizot [6] il faut mettre à part les « cailloutis culminants » du type de celui qu'en trouve à Pujaudran (Gers) qui seraient des formations provenant de poudingues miocènes soient désagrégés sur place, soient remaniées en formations ayant l'allure d'un dépôt de plateau. Leur composition diffère nettement de celle des terrasses.

*I*re *Terrasse,* la plus ancienne, ou encore « Niveau supérieur » située à 120-130 m au-dessus de la « Basse plaine ». Attaquée par l'érosion, elle laisse apparaître par place le substrat molassique. Les vallées des affluents secondaires tels que la Save ou le Touch, l'ont fragmentée en îlots. C'est sur ce niveau que s'étend l'extrémité S-W de la forêt de Bouconne.

*II*e *Terrasse* ou « Haut Niveau » située environ à 90 m au-dessus de la « Basse plaine ». Son extension est assez réduite par rapport aux niveaux inférieurs et sa surface fragmentée par l'érosion. La forêt de Bouconne dans sa partie centrale est établie sur cette IIe Terrasse.

*III*e *Terrasse* ou « Moyen Niveau » située 45 m environ au-dessus de la « Basse plaine ». C'est la terrasse la plus importante par son étendue. On peut la suivre, de façon continue, depuis la sortie des Petites Pyrénées jusqu'aux environs de Castelsarrasin. A la hauteur de Toulouse, elle s'étale sur une dizaine de kilomètres de large.

*IV*e *Terrasse* ou « Bas Niveau » située environ à 15 m au-dessus de la suivante. Légèrement moins étendue que la précédente elle se suit de façon continue jusqu'au delà de Grisolles.

*V*e *Terrasse* constituant la basse plaine, appelée encore « Niveau inférieur ». Certains auteurs la considèrent comme formée d'alluvions récentes par opposition aux terrasses supérieures classées comme alluvions anciennes. En effet, dans toutes les vallées des fleuves d'Europe et d'Afrique débouchant sur l'Océan Atlantique, on retrouve constamment ces quatre niveaux alluvionnaires.

La « Basse plaine » peut être suivie de façon absolument continue dans le cours moyen de la Garonne. C'est ce niveau qui sert de référence pour donner la hauteur relative des différentes terrasses, car il n'existe pas de parallélisme rigoureux entre le niveau actuel du fleuve et celui des autres terrasses. Le lit de la Garonne s'encaisse en amont de Toulouse. Alors qu'au niveau de cette ville la « Basse plaine » est à une dizaine de mètres au-dessus du niveau du fleuve à l'étiage, en amont, cette dénivélation peut atteindre une vingtaine de mètres pour diminuer à nouveau en approchant des Petites Pyrénées.

Entre le niveau du fleuve à l'étiage et à la basse plaine, se situe une bande de terre, de largeur variable, disposée plus ou moins en gradins successifs, inondables lors des fortes crues et constituant le lit majeur. Certains en font une VIe Terrasse ou niveau actuel.

APERÇU PÉDOLOGIQUE

La Garonne est loin d'avoir atteint son profil d'équilibre, et la phase de creusement se produit de nos jours, notamment dans la région Toulousaine, sa moyenne vallée. Lors des fortes crues, elle est susceptible de modifier le tracé de son lit actuel. Tandis que se poursuit cette phase de creusement, les dépôts alluvionnaires se constituent de part et d'autre de son lit.

Les dépôts actuels, fortement hétérogènes, contiennent toutes sortes d'éléments. Parmi les gros galets, on trouve en abondance des éléments essentiellement siliceux tels que quartz d'origine filonienne, quarzites, etc., mais aussi des granites plus ou moins

altérés, mélangés à d'autres roches telles que les ophites, les gneiss, etc... provenant du démantèlement des Pyrénées.

Le sable est lui aussi hétérogène. Aux éléments siliceux prédominants sont mélangés des éléments micacés surtout muscovite, et des éléments carbonatés, dont la présence, même en faible proportion va jouer un rôle de première importance dans la formation du sol qui suivra.

Les éléments fins, limons et argiles, qui se déposent dans les zones calmes, contiennent aussi des carbonates.

Il semble logique d'admettre, que parmi les différents types de minéraux transportés par le fleuve au cours de l'élaboration des terrasses anciennes, ils ont toujours été représentés.

Actuellement, on assiste à leur départ rapide dans les sols récemment formés. Ceux de la V^e^ terrasse sont pour la plupart entièrement décalcifiés. Or nous avons vu que les alluvions actuelles ont une teneur appréciable en calcaire. Le lessivage se traduisant initialement par le départ des bases joue donc un rôle de première importance, dès le début de la formation de ces sols. La topographie sub-horizontale des terrasses, limitant au minimum les pertes d'eau par ruissellement, accélère ces phénomènes d'entraînement dont les conséquences sont d'autant plus marquées que les sols sont plus âgés. C'est effectivement dans l'ensemble ce que l'on peut constater; les sols des terrasses anciennes sont plus évolués que ceux des récentes.

Dans la mesure où l'on peut considérer la formation du grepp comme traduisant un certain stade d'évolution, on remarque que la V^e^ terrasse en est généralement dépourvue, tandis qu'il fait son apparition, sous une forme encore friable dans les sols de la IV^e^ Terrasse pour devenir, dans les terrasses plus anciennes, une formation compacte et continue.

En dehors de cette migration du fer, le lessivage se traduit aussi par un entraînement vers la profondeur des éléments fins. Cet entraînement peu sensible dans les sols de la V^e^ terrasse devient de plus en plus important, au fur et à mesure qu'on considère des terrasses plus anciennes. Avant de conclure à un entraînement d'argile il est nécessaire d'avoir dépouillé les résultats donnés par l'analyse physique d'un grand nombre d'échantillons d'une même région. La sédimentation, d'origine fluviale, est par nature hétérogène. Les zones calmes, à remous, seront par exemple plus riches en éléments fins que les parties occupées par l'axe du courant. Ce n'est donc qu'après avoir constaté une variation positive systématique du taux d'argile en profondeur que l'on pourra conclure à son entraînement. Ceci a été démontré par de nombreux travaux, tels que ceux effectués par M. Liwerant [7].

De plus, l'entraînement de l'argile dans ces sols s'accompagne généralement de sa dégradation, se traduisant par une diminution

de sa capacité d'échange. Nikolitch l'a signalé dès 1930 dans une étude portant notamment sur les sols de la région Toulousaine [8].

Nous venons de voir quelques caractères généraux de ces sols. Il serait abusif de croire, que sur une même terrasse, l'évolution soit arrivée uniformément au même stade. On enregistre des variations locales dues à plusieurs facteurs dont l'un des plus importants est la perméabilité. Elle est d'ailleurs elle-même étroitement liée à la granulométrie des sédiments et à leur aptitude à donner des agrégats sous l'influence des colloïdes argileux et humiques.

La surface des terrasses, à peu près horizontale, comporte cependant de légères dépressions où l'eau peut s'accumuler.

La profondeur des sédiments n'est vraisemblablement pas constante et si la surface actuelle est à peu près plane il en est différemment de la couche de marnes sous-jacentes, intensément ravinée par les eaux lors du passage du fleuve. Cette irrégularité dans l'épaisseur et la nature des sédiments entraîne des variations dans le niveau et le régime d'écoulement de la nappe phréatique dont les effets se font sentir sur le sol.

La végétation, essentiellement forestière autrefois comme en témoignent les vestiges actuels tels que la forêt domaniale de Bouconne, a vraisemblablement accéléré le lessivage de ces sols. Nous n'insisterons pas davantage sur l'étude générale de ces phénomènes de lessivages qui sortent du cadre de ce travail. Il nous a paru cependant nécessaire de souligner la fragilité de ces sols qu'une mise en culture sans précautions peut ruiner pour des générations. L'étude détaillée d'une parcelle, montrera à quels stades de dégradation l'on peut aboutir en oubliant que le sol est un milieu vivant, en évolution permanente.

ÉTUDE DU TERRAIN EXPÉRIMENTAL

CHOIX DES ÉCHANTILLONS

Cette étude portera essentiellement sur la parcelle du Domaine de Monlon (E.N.S.A.T.) déjà décrite au début de ce travail, fig. 1.

Nous rappellerons simplement qu'à l'extrémité ouest, dans la zone de raccordement des deux terrasses, se trouve une partie constamment humide, due à l'émergence des eaux circulant au niveau des marnes sous-jacentes.

La stérilité, évaluée par l'observation est la même sur l'ensemble du champ, sauf :

1° Dans une zone, approximativement centrale, située en bas de la pente et autrefois envahie par le chiendent durant toute la durée de la culture de la vigne;

2° Aux environs du point d'eau;

3° En bordure de la parcelle non cultivée.

La vigne voisine représente un état du même sol comparable au terrain à étudier. La végétation naturelle y laisse prévoir une dégradation analogue.

Le prélèvement d'une série d'échantillons, d'une part entre 0-10 cm de profondeur dans la région prospectée par les racines au début de végétation, d'autre part entre 10 et 20 cm s'est fait aux différents points suivants :

(1) zone stérile en haut de pente.

(2) zone stérile à mi pente.

(3) zone stérile au bas de la pente.

(4) et (5) vigne actuelle. Un labour ayant été récemment effectué, les échantillons (4) ont été prélevés entre les lignes (au fond du sillon) et les échantillons (5) entre les pieds.

(6) zone centrale, anciennement envahie par le chiendent.

(7) zone située aux environs du point d'eau.

(8) bordure du champ.

La détermination du pH, la valeur des segments OA, OB et du rapport de saturation OA/AB [9] ont permis de constater l'identité des échantillons prélevés dans une même zone. Les échantillons situés immédiatement au contact de deux zones différentes présentaient des caractères intermédiaires. La même étude a montré qu'il n'y avait aucun intérêt complémentaire à considérer les prélèvements effectués entre 10 et 20 cm.

Nous avons entrepris l'étude des 8 échantillons caractéristiques numérotés de 1a à 8a. Les emplacements de ces prélèvements indiqués sur la fig. 1, correspondent aux zones précédemment définies.

Les échantillons 1a, 2a, 3a d'une part et les échantillons 4a et 5a d'autre part, ayant donné des résultats quasi identiques, l'exposé portera uniquement sur les échantillons 1a, 5a, 6a, 7a et 8a.

Nous avons pris comme témoin T, un échantillon provenant d'un sol de culture régulièrement entretenu, voisin du sol étudié, et placé dans la même situation topographique. Une étude antérieure de ce sol a montré qu'il correspond à une fertilité normale pour un sol agricole de la V^{e} Terrasse et que ses caractéristiques sont restées a peu près constantes pendant une longue période. On peut considérer T comme représentant l'état normal du sol n'ayant pas ou peu subit de processus de dégradation. Il constitue un meilleur témoin que 8a qui, recouvert d'une végétation de type prairial, est assez fortement humique et se différencie de ce fait des autres échantillons.

Une coupe, faite dans la zone la plus dégradée à l'emplacement de l'échantillon 1a jusqu'à une profondeur de 160 cm a permis de suivre les variations du pH et de la granulométrie.

ÉTUDE DES ÉCHANTILLONS DE SURFACE

1° *Analyse physique*

Le sol a étudier se présente comme un sol sableux, riche en éléments fins et pauvre en colloïdes. Il n'a pas de structure. L'observation de la surface révèle un ravinement intense causant une lévigation des particules fines le long des sillons. Au bas de la pente, ces éléments fins, apportés par les pluies hivernales et printanières recouvrent par place sur une épaisseur de 1 à 5 millimètres, le sol préparé à l'automne précédent. Le sol sans cohésion est devenu très mobile. La surface, notamment dans la partie en pente, est parsemée de nombreux cailloux et graviers. Sur les 20 premiers centimètres, la terre fine ne représente guère que 60 % du volume.

L'analyse physique a été faite selon la méthode classique de décantations successives après dispersion en milieu sodique et élimination des ions floculants.

La matière organique a été évaluée par la méthode au bichromate sulfurique.

Le tableau 1 donne les résultats obtenus, rapportés à la terre fine sèche.

TABLEAU I

Analyse granulométrique des échantillons étudiés

	Argile % < 2 μ	Limons % 2-20 μ	Sables fins % 20-200 μ	Sables grossiers % 200-2000 μ	Matière organique %
1 a	11,2	13,8	39,2	35,0	0,8
5 a	9,3	12,4	47,1	30,5	0,7
6 a	9	17,7	49,4	22,8	1,1
7 a	8,6	20,1	41,1	27,6	2,6
8 a	11,4	18,6	38,8	27,6	3,6
T	11,2	13,8	38,6	34	2,4

Le sol étudié est caractérisé par une proportion importante en éléments sableux. D'après ces résultats on pourrait le placer dans la catégorie des terres sableuses.

La teneur en matière organique est faible, plus particulièrement pour les échantillons 1a et 5a. L'échantillon 8a, sous couvert d'herbe se distingue par une teneur nettement plus élevée en matière organique qui lui assure une plus grande cohésion et pallie la pauvreté en éléments colloïdaux minéraux.

2° *Étude du pH*

La mesure du pH dans l'eau distillée bouillie nous a donné les résultats mentionés dans le tableau II :

TABLEAU II

NUMÉRO ET LIEU DU PRÉLÈVEMENT	pH
1a. Zone stérile.....	3,95
5a. Vieille vigne.....	4,0
6a. Zone à chiendent.....	4,6
7a. Zone humide.....	5,5
T. Témoin.....	6,8

Nous constatons que la diminution de l'état de fertilité s'accompagne d'une augmentation de l'acidité. L'évaluation du pH semble donc, pour un test rapide sur les types de sols étudiés, une bonne mesure de fertilité. Nous l'avons largement utilisée, au cours de notre travail, pour la prospection et le choix des échantillons.

La connaissance du pH qui résulte de nombreux facteurs ne peut à elle seule caractériser un sol. Nous avons recherché pour cela des grandeurs plus stables telles que l'évaluation des bases déplaçables OA et du rapport de saturation $\frac{OA}{AB}$

3° *Détermination de la capacité d'échange et du rapport de saturation.*

La technique utilisée et les conventions adoptées sont celles du laboratoire de Chimie telles qu'elles ont été exposées dans de nombreux travaux résumés dans une note antérieure [9] à laquelle on se reportera. Le tableau III donne les valeurs de OA, OB, AB, OA/AB, OA_1, OB_1, A_1B_1 exprimées en m.éq. pour 100 g de terre fine séchée à l'air. Le pH indiqué est celui de la suspension colloïdale obtenue après centrifugation du tube O.

Le tableau IV complète ces renseignements en donnant les quantités de Ca et Mg en m.éq. pour 100 g de terre contenues dans OA et les rapports Ca/Mg.

Ca et Mg ont été déterminés dans les extraits chlorhydriques correspondants aux segments OA par le complexone III avec la murexide comme indicateur de l'ion Ca^{++} et le noir ériochrome comme indicateur de l'ion Mg^{++} après élimination des ions Al^{+++}

et Fe+++. Les résultats ont été vérifiés par les techniques usuelles de précipitation de l'oxalate de calcium d'une part et du phosphate ammoniaco-magnésien d'autre part.

TABLEAU III

Résultats relatifs à la capacité d'échange

ÉCHAN. TILLON N°	OA	OB	AB	OA/AB	OA_1	OB_1	A_1B_1	PH
1a	1,8	6,6	8,4	0,21	2,9	10,6	13,5	5,4
5a	1,8	6,6	8,4	0,21	3,2	9,5	12,7	5,7
6a	2,3	7,5	9,8	0,24	3,4	11	14,4	6,0
7a	4,5	7,8	12,3	0,36	8	11,7	19,7	6,3
T	6	6,8	12,8	0,47	8,7	11,5	20,2	6,8
8a	5,2	12,5	17,7	0,30	7,4	19,2	26,6	5,6

La technique suivie, adaptée d'après celles citées par CHARLOT et BÉZIER [10], a été précisée dans une note [11].

TABLEAU IV

Teneur en Ca++ et Mg++ échangeables exprimée en m.éq./100 g de terre

ÉCHANTILLON N°	Ca++	Mg++	Ca/Mg
1a	1,2	0,6	2
5a	1,2	0,6	2
6a	1,65	0,65	2,55
7a	3,45	1,05	3,3
T	4,65	1,35	3,45

La figure 2 donne la représentation des échantillons en expérience à l'aide des schémas habituels.

Pour chaque détermination des segments selon la technique indiquée, on a pris la valeur du pH dans chaque tube, après centrifugation et construit les courbes de neutralisation.

Les figures 3 et 4 représentent, à titre d'exemples, les courbes obtenues pour l'échantillon 1a correspondant à l'état de plus grande dégradation et pour le témoin T.

4. *Interprétation des résultats*

Les résultats obtenus dans l'étude de ce type de sol permettent de se faire une idée des phénomènes chimiques dont il est le siège.

1° Remarquons l'identité quasi-complète des échantillons 1a et 5a : il n'y a aucune différence entre les parties les plus dégradées de l'ancienne vigne et de la vigne actuelle.

2° On observe une relation frappante entre les valeurs de OA et du rapport OA/AB d'une part et l'état de stérilité observé d'autre part. On peut admettre que la dégradation de la fertilité va en croissant depuis le témoin T état normal pour le sol considéré, jusqu'à l'échantillon 1a, stérilité quasi-totale. Le rapport OA/AB s'abaisse alors de 0,5, valeur convenable pour les sols de la région, à 0,2. La valeur de OA, représentant les bases facilement déplaçables, s'abaisse de 6 à 1,8 m.éq./100 g.

On voit ainsi que le processus de dégradation a abaissé la réserve en bases au 3/10 de sa valeur normale.

Nous nous trouvons en présence d'un sol vidé de ses réserves en calcium-magnésium, à pouvoir tampon très réduit. Le rapport Ca/Mg relatif aux bases déplaçables est lui aussi altéré : il passe de 3,55 à 2. Le calcium est plus rapidement entraîné que le magnésium. L'altération de ce rapport est à considérer : le déséquilibre entre ces ions peut éventuellement jouer un rôle dans la physiologie de l'alimentation des plantes.

3° Les variations de OB et AB conduisent à des conclusions moins évidentes à première vue que celles de OA et du rapport OA/AB. Elles sont cependant très intéressantes. Reportons-nous au schéma de la fig. 2.

FIG.2 . REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE

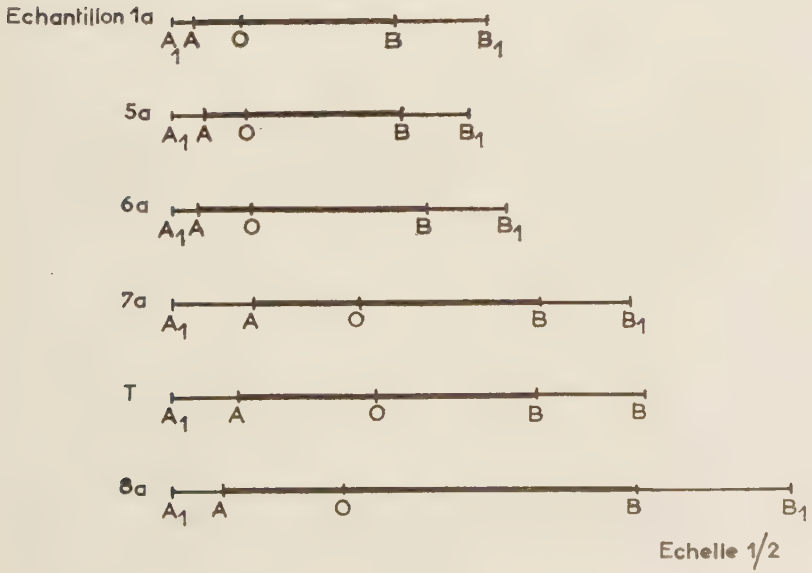
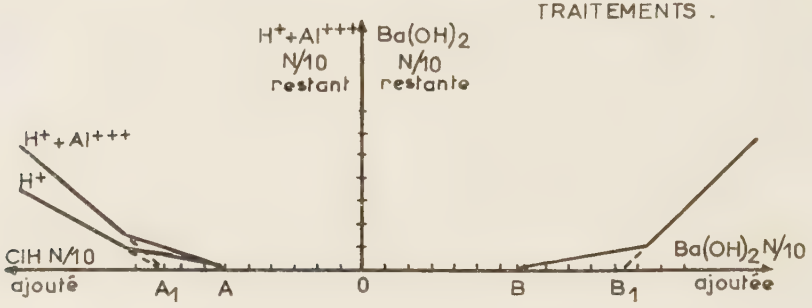


FIG. 3. TÉMOIN T.

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET COURBE DES VARIATIONS DU pH AU COURS DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS.



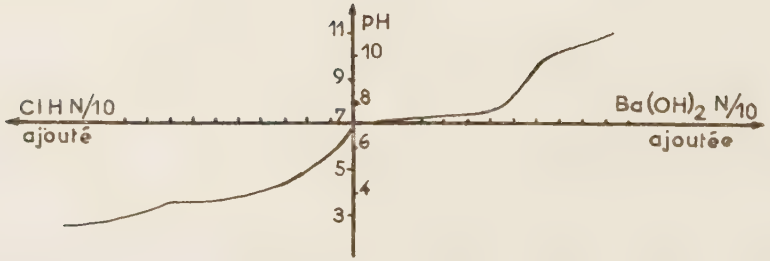
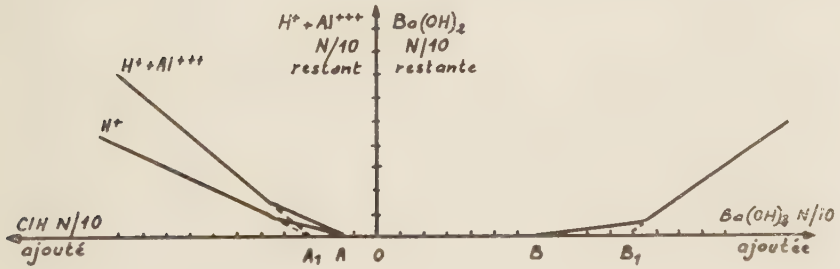
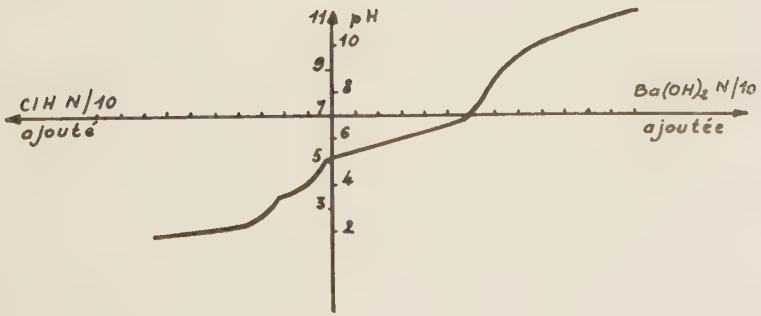


FIG.4 . ECHANTILLON 1 a .

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET COURBE DES VARIATIONS DU pH AU COURS DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS.





Pour l'échantillon 7a, le segment AB a pratiquement la même valeur que pour T, la capacité d'échange est la même, tout se passe comme si le point O s'était simplement déplacé vers A. On peut émettre l'hypothèse qu'au début de l'acidification du sol celle-ci se traduit par une hydrolyse des alumino-silicates de calcium et de magnésium, calcium et magnésium ainsi libérés sont entraînés par les eaux et il se forme un acide alumino-silicique correspondant.

Pour les échantillons suivants: 6a, 1a, la diminution de la valeur de OA_1 n'est pas accompagnée comme précédemment de l'augmentation de celle de OB, donnant une capacité d'échange constante; au contraire, la valeur de OB varie peu et AB diminue. Par ailleurs, la quantité d' « argile », déterminée à l'analyse physique, est du même ordre pour tous les échantillons. Dans ces conditions, la capacité d'échange du sol ne s'abaisse pas par appauvrissement du taux d'argile, mais vraisemblablement par diminution de la valeur du segment OB. Les mécanismes de cette dégradation sont complexes; on peut par exemple émettre l'hypothèse d'un détachement des radicaux acides non saturés [8]. D'autres mécanismes peuvent aussi être invoqués.

On remarquera d'ailleurs que la capacité d'échange représentée par AB et rapportée à un même poids d'argile, 100 g par exemple, passe de 143 m.éq. pour 7a, à 75 m.éq. pour 1a.

On peut donc considérer comme un fait expérimental la dégradation de la fraction chimiquement active du sol, les silicates évoluant alors vers une forme inerte. Cette dégradation de l'argile, observée et étudiée par Nikolitch comme nous l'avons signalé au début de ce chapitre, trouve là sa démonstration.

4° Le rapport de saturation, évalué par OA/AB, s'abaisse à des valeurs très basses, telles que 0,2 pour les échantillons les plus dégradés comme 1a. Si on remarque qu'en valeur absolue OA est très faible, 1,8, on voit que le sol étudié ne présente aucune résistance à l'acidification.

La courbe de neutralisation (cf. fig. 3) montre que par traitement à l'acide dilué, l'acidification est très rapide, même pour le témoin T. A l'origine, ce sol présente donc un rapport OA/AB correct, mais la valeur de OA est faible, et sa capacité d'échange également.

Il n'est pas étonnant de voir ce sol, placé dans des conditions défavorables, évoluer vers l'état de l'échantillon 1a dont le pH peut atteindre des valeurs très basses : 3,9 pour la suspension de terre dans l'eau distillée et 5,4 pour la solution colloïdale après centrifugation.

Il est possible que le pH de la solution du sol, au contact avec des ions H^+ liés, mais dont l'activité n'est pas nulle, atteigne des valeurs plus basses que celles trouvées précédemment. Les sels de calcium et de magnésium peuvent alors être rapidement dissociés. L'aluminium lui-même peut exister à l'état libre dans certaines conditions.

5° Si on agite la terre avec de l'eau distillée et si on centrifuge, c'est le cas par exemple des expériences sur les tubes O dans la détermination de OA et OB, le liquide surnageant après centrifugation est limpide pour T qui contient une quantité suffisante d'ions floculants et dont le pH est voisin de la neutralité, tandis que pour l'échantillon 1a il est fortement colloïdal, coloré en jaune. C'est une véritable suspension d'argile, impossible à précipiter par une centrifugation poussée, ni à faire déposer par un repos de plusieurs semaines.

Les éléments colloïdaux sont donc très facilement mis en suspension stable dans l'eau, entraînant un lessivage rapide de l'argile.

L'étude des propriétés chimiques de ce sol a mis en évidence son état particulièrement dégradé. Cette dégradation est-elle limitée à la partie superficielle ou affecte-t-elle aussi les couches plus profondes ?

Etude rapide du sous-sol

Dans ce but, nous avons creusé une fosse de 1,60 m de profondeur, dans la zone la plus dégradée, près du prélèvement n° 1.

L'analyse d'une série d'échantillons prélevés à différents niveaux nous a permis de constater un enrichissement progressif en argile, allant de 11 % en surface jusqu'à 24,5 % à — 1,50 m. Le pourcentage de limons et de sables fins varie peu, tandis que le taux de sables grossiers passe de 35 % en surface à 11,5 % à — 1,50 m.

L'acidité, qui reste élevée, diminue très légèrement vers — 1,5 m.

La capacité d'échange augmente avec la profondeur en même temps que le taux d'argile, mais cette argile est dans le même état que celle de surface, puisque sa capacité d'échange reste constante et de l'ordre de 75 m.éq./100 g. Le rapport de saturation reste faible, 0,3 à — 1,5 m, et suit les mêmes variations que le pH.

Le sous-sol, jusqu'à 1,5 m, ne renferme pas d'horizon d'accumulation des bases. C'est donc sur une très grande épaisseur qu'ont porté les processus de débasification et de dégradation.

Conclusions

L'état normal du sol étudié est représenté par le témoin T. Sous cet état, on le classe au point de vue physique dans la catégorie des terres sablo-argileuses peu humifères, et au point de vue pédologique dans la catégorie des sols peu lessivés. Il est totalement dépourvu de calcaire. On a tout lieu de penser qu'à l'origine il en contenait une faible proportion, du même ordre que celle des limons actuels de la Garonne.

Il est naturellement assez pauvre en bases déplaçables : sa capacité d'échange est faible. Ce fait est en liaison avec sa nature

minéralogique d'une part et avec la faible proportion d' « argile » d'autre part. Bien que le rapport OA/AB soit correct, le pouvoir tampon est faible.

C'est donc un sol dont l'équilibre est instable. Il peut très facilement subir un processus de dégradation du même type que celui communément observé sur les terrasses plus anciennes.

Sur le terrain étudié, le processus de dégradation a joué de façon extrêmement brutale. La lutte contre l'oïdium de la vigne nécessitait jusqu'à ces dernières années l'utilisation de « soufre en fleur » en saupoudrage. Ce dernier, par oxydation, donnait partiellement de l'acide sulfurique dont l'action sur ces sols devait amener une dégradation d'autant plus rapide qu'ils sont dépourvus de calcaire et présentent, comme nous l'avons montré, une résistance très faible à l'acidification; d'autres facteurs ont pu d'ailleurs jouer conjointement pour accélérer ces processus, notamment la pauvreté en matière organique, conséquence du mode de culture de la vigne sur sol nu.

Nous aboutissons ainsi à un sol qui, au point de vue physique, a perdu toute structure et se trouve considérablement appauvri en argile dans les couches superficielles.

La fraction chimiquement active du sol est profondément altérée : la capacité d'échange représentée par AB a diminué du 1/3 en valeur absolue, et la capacité d'échange rapportée à un même poids d'argile de 1/2. Le rapport de saturation est tombé au 4/10 de sa valeur normale.

Dans ces conditions, le pouvoir tampon du sol est pratiquement détruit; l'acidité peut alors atteindre les valeurs extrêmes que nous avons indiquées.

Autres observations

Nous venons d'étudier en détail la parcelle qui a servi de base à la suite de nos travaux, mais nos observations ont porté sur de nombreux sols d'alluvions des vallées de la Garonne, du Tarn et de leurs affluents, cultivés traditionnellement en vigne. Elles montrent que leur stérilité est toujours accompagnée d'un état du sol particulièrement dégradé.

Dans la vallée de l'Agoût, à Labarthe, 4 km en amont de Saint-Sulpice (Tarn), nous avons trouvé dans une vieille vigne des pH en surface de l'ordre de 3,9-4 dans l'eau, 3,7-3,8 dans le ClK (N) neutre. Cette acidité se développe aussi dans le sous-sol. La couche 45-55 cm a un pH de 5 dans l'eau et 3,9 dans le ClK (N).

Il est intéressant de remarquer que les valeurs du pH dans le ClK (N) sont sensiblement constantes aux différentes profondeurs et de l'ordre de 3,7-3,9, tandis que celles obtenues dans l'eau passent de 3,9-4 en surface à 5 à — 50 cm.

Ceci mériterait une étude approfondie qui sort du cadre de ce travail. Nous pouvons cependant indiquer que le traitement par une solution neutre de ClK (N) fait passer une quantité notable d'aluminium en solution, de l'ordre de 0,4 à 1 m.éq./100 g dans ce type de sol.

Il s'y trouve donc sous une forme « facilement déplaçable » par les cations et assure, par son effet tampon, une relative stabilité du pH dans le ClK aux différents niveaux [12, 13].

Cet aluminium ne passe pas en solution dans l'eau et n'intervient donc pas ou très peu dans la mesure du pH à l'eau distillée. Dans ce cas, à l'acidité minérale assez réduite vient s'ajouter une acidité d'origine organique. Il est donc normal que les couches profondes dans lesquelles l'activité biologique est réduite soient moins acides que celles de surface.

L'activité des thiobactériales dans ces sols peut contribuer grandement à leur acidification.

De plus, comme ces types de sols considérablement dégradés ont un pouvoir tampon très faible, les variations dans l'activité des microorganismes au cours des saisons doivent se traduire par des variations de pH correspondantes. Effectivement, nous avons suivi ces fluctuations au cours de l'année sur le défrichement d'une vieille vigne du domaine de Monlon situé sur la IV[e] terrasse. Les mesures, au moyen d'un pH mètre portatif à piles (*a*), sur le sol en place, ont donné aux différentes époques les résultats mentionnés dans le tableau V.

TABLEAU V

Variations saisonnières du pH

ÉPOQUE DES MESURES	VALEUR DU PH DANS L'EAU DISTILLÉE	VALEUR DU PH DANS ClK (N)
Début décembre 1960..	4,8	3,5
Début mars 1961.....	4,7	3,5
Début juillet 1961.....	4,3	3,4
Fin août 1961.....	4,2	3,5

Les valeurs du pH dans le ClK (N) sont sensiblement constantes et de l'ordre de 3,5-3,6, tandis que celles obtenues dans l'eau indiquent une acidification maximum au début de l'été, c'est-à-dire à l'époque où l'activité microbienne est intense. Pendant la période hivernale, cette activité est réduite et les eaux de pluie peuvent entraîner une partie des acides organiques formés. On constate effectivement à ce moment-là une diminution d'acidité.

(a) pH mètre Philips Modèle PR 9401/01 muni d'électrodes Ingold, type 405/2.

L'étude des autres caractéristiques chimiques de ces sols d'alluvions de la vallée de l'Agoût conduit aux mêmes conclusions que celles énoncées à l'issue de l'étude du terrain expérimental (TE) de Monlon.

La capacité d'échange augmente légèrement en profondeur par suite de l'élévation du taux d'argile, mais la capacité d'échange de cette dernière reste sensiblement constante et faible aux environs de 75 m.éq./100 g.

Le rapport de saturation de l'ordre de 0,15 souligne encore la dégradation extrême de ce sol.

Après une longue période de sécheresse prolongée, une cinquantaine de jours vers la fin de l'hiver 1961, M. Lacroix et moi-même avons été frappés de constater l'apparition d'efflorescences de sels blanchâtres à la surface des « croûtes » qui recouvrent ces types de sols battants.

L'analyse de ces « croûtes » nous a permis d'y déceler un taux considérable de sulfate de Ca et de Mg :

$SO_4^=$	11	g/kg de terre,
Ca^{++}	2,1	g/kg de terre,
Mg^{++}	0,9	g/kg de terre.

La période de sécheresse prolongée a provoqué la remontée des sels entraînés par la circulation ascendante de l'eau et amené leur concentration à la surface du sol, ce qui a permis leur observation. Effectivement, des dosages effectués sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs nous ont donné des taux beaucoup plus faibles que ceux observés dans les croûtes superficielles. A 50 cm de profondeur, nous avons encore 0,25 ‰ de $SO_4^=$.

Le fait est d'autant plus remarquable que ces sols contiennent naturellement des sulfates, seulement à l'état de traces très faibles.

Les sulfates ont été dosés par gravimétrie du SO_4Ba et le Ca^{++} et Mg^{++} par la méthode au complexone III, sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique. Les résultats ont été vérifiés par précipitation de l'oxalate de calcium et dosage au MnO_4K.

Pour la recherche qualitative rapide des sulfates nous avons utilisé la propriété qu'a le précipité de SO_4Ba d'entraîner avec lui des ions MnO_4^- qui le colorent en rose [14]. La recherche qualitative du Ca^{++} a été effectuée d'après la méthode de Triché, basée sur les phénomènes d'épitaxie [15].

La coprécipitation du CO_3Ca et du CrO_4Ag_2 entraîne entre deux cristaux de CO_3Ca du Cro_4Ag_2 le masquant ainsi mécaniquement, au moins pour un certain temps aux réactifs chimiques. Le CrO_4Ag_2 n'est pas dissous intégralement par quelques gouttes de NH_4OH. Cette réaction est spécifique du Ca^{++}. Pour de telles recherches pratiques sur le sol, la méthode de Triché est particulièrement avantageuse.

Nous venons de voir que les caractéristiques particulières de ces types de sols peuvent bouleverser la dynamique habituelle des éléments. Un tel milieu a provoqué vraisemblablement la sélection d'une microflore spéciale, aussi bien dans la population bactérienne que cryptogamique dont l'incidence sur l'évolution de la matière organique de ces sols et même des éléments minéraux reste à préciser.

CHAPITRE III

MÉTHODES ET TECHNIQUES DE DOSAGE DU CUIVRE

MINÉRALISATION

Nous avons utilisé les deux types de méthodes par voie humide et par voie sèche pour effectuer la minéralisation des échantillons de sol, afin d'obtenir plus de sécurité dans les résultats.

Minéralisation par voie sèche

Un échantillon de 3 g environ de terre fine séchée à l'air est placé dans une capsule à fond plat de 8 cm de diamètre et imbibé d'une solution concentrée de $(NO_3)_2Ca$, afin d'opérer la minéralisation en milieu oxydant. On diminue ainsi les risques de pertes partielles sous forme de cuivre carbonyle volatil. Après séchage à 105°C, la capsule placée dans un four électrique est portée progressivement et lentement à une température de l'ordre de 450 à 500°C. Après deux ou trois heures de chauffage, la minéralisation est terminée en maintenant environ une heure la température à 550-600°C.

Les cendres sont reprises par une solution de SO_4H_2. Après filtration sur verre fritté n° 4 et lavage à l'eau bidistillée, la solution, complétée à un volume connu, est prête pour l'analyse.

Minéralisation par voie humide

Nous avons effectué, sur les échantillons de terre, une attaque sulfonitrique suivant la méthode de Deniges.

Pour les échantillons végétaux, nous avons préféré l'attaque sulfonitro-perchlorique, plus rapide que la précédente.

L'échantillon végétal, de l'ordre du décigramme, introduit dans un petit matras de 50 ml ou dans un gros tube à essai, est attaqué par le mélange de 1 à 2 ml de SO_4H_2 concentré R.P. et 5 à 10 ml de NO_3H concentré R.P. Après ébullition de quelques minutes, la plus grande partie de la matière organique ayant été oxydée, on ajoute goutte à goutte un mélange nitro-perchlorique formé par un volume de NO_3H et deux volumes de ClO_4H, jusqu'à décoloration complète. On chauffe ensuite pour évaporer l'excès d'acide nitrique

et perchlorique ainsi qu'une partie de l'acide sulfurique. Après refroidissement, on ajoute de l'eau bidistillée et on amène à un volume connu la solution qui est prête pour l'analyse.

Nous avons utilisé cette méthode, de préférence à l'incinération, pour éviter les risques de pertes de cuivre. D'autre part, elle permet d'opérer plus rapidement et se prête au travail en série.

DOSAGE DU CUIVRE

Généralités. Choix de la méthode

Le Cuivre qui se trouve à l'état de traces, aussi bien dans les plantes que dans le sol, demande pour son dosage une méthode particulièrement sensible. En dehors de la spectroscopie, les méthodes basées sur l'utilisation de réactifs organiques tels que le diéthyldithiocarbamate de Na ou la diphénylthiocarbazone, donnant des composés colorés avec certains ions métalliques, sont couramment utilisées pour la séparation et le dosage d'éléments minéraux à l'état de traces.

Nous avons choisi, pour le dosage du Cuivre, la diphénylthiocarbazone ou dithizone, de formule

$$S = C \begin{cases} NH - NH - C_6H_5 \\ N = N - C_6H_5 \end{cases}$$

de préférence au diéthyldithiocarbamate de Na, car elle est plus sensible que ce dernier, et de plus, elle permet de faire le dosage en milieu acide.

Ainsi, les complications dues à la précipitation des sels de Ca, Mg, Fe, Al... ou des phosphates, sont évitées.

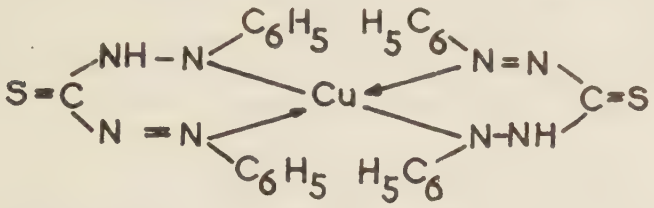
La dithizone est soluble dans les solvants organiques tels que le tétrachlorure de carbone, ou le chloroforme, en donnant des solutions vertes. Dans l'eau, sa solubilité est extrêmement faible en milieu neutre ou acide. Elle devient considérable en milieu alcalin, où elle se trouve sous forme d'anions.

$$H\,Dz \rightleftarrows Dz^- + H^+.$$

La dithizone a la propriété de donner avec de nombreux ions métalliques des composés colorés dont la solubilité dans les solvants organiques est beaucoup plus importante que dans l'eau. Cette propriété permet d'extraire des ions métalliques contenus dans une solution aqueuse par agitation de cette phase aqueuse avec une solution de dithizone dans le solvant organique. En choisissant un pH convenable, pour que le ou les dithizonates formés soient stables, on peut n'extraire qu'un ou plusieurs ions déterminés.

Principe

Le Cu++ donne avec la dithizone un composé de couleur rouge violacée en milieu acide, forme cétonique



et un composé de couleur brune en milieu alcalin, forme énolique [10]. Nous avons utilisé pour les dosages, la forme cétonique, par suite de sa plus grande sensibilité (teinte violette). De plus, comme nous l'avons indiqué précédemment, les opérations chimiques sont considérablement simplifiées en milieu acide.

Le solvant utilisé est le tétrachlorure de Carbone de préférence au chloroforme à cause de sa plus grande densité, plus faible volatilité et plus faible solubilité dans l'eau.

Le cuivre est extrait sous forme de dithizonate par agitation de la solution à doser avec une solution tétrachlorique de dithizone. Cette extraction, qui peut se faire pour des valeurs de pH comprises entre 0,5 et 5, est d'autant plus lente que le milieu est plus acide. On se place donc à pH 3-3,2 où l'extraction est assez rapide, mais on extrait en même temps que le cuivre, le Zn ainsi que d'autres éléments rares dans la nature, tels que Au+++, Pt++++, Pd++, Ag+, Hg++, Sn++, Bi+++.

On se débarrasse du dithizonate de Zn, qui est instable à pH 2, en agitant la solution de dithizonates avec une solution de ClH N/100.

Ainsi, seul le dithizonate de Cu reste dans la solution tétrachlorique. L'excès de dithizone est enlevé par lavage avec une solution aqueuse de NH_4OH diluée.

L'intensité de la coloration violette, qui s'altère avec le temps, est mesurée aussitôt au photocolorimètre dans la zone d'absorption maximum vers 5100 A°. Elle suit la loi de Lambert-Beer.

Préparation du matériel et des réactifs

Le dosage d'éléments à l'état de traces nécessite un soin tout particulier apporté au nettoyage de la verrerie et du matériel en général, ainsi que des conditions méticuleuses de propreté dans les différentes manipulations.

La verrerie, en pyrex, est lavée au mélange sulfochromique à chaud. Après l'avoir abondamment rincée à l'eau distillée, elle est soumise à un lessivage par la vapeur d'eau bouillante obtenue à

partir d'eau distillée suivant le schéma ci-contre (fig. 5). Ce système présente l'avantage, en plus d'un nettoyage particulièrement efficace, d'obtenir un séchage rapide.

Le laboratoire devra être propre et l'on travaillera à l'abri de toute poussière. L'usage des becs bunsen en cuivre et des tuyaux de caoutchouc est à éviter le plus possible.

Les filtres utilisés sont des filtres « Durieux » lavés à NO_3H R.P. à 10 %, rincés à l'eau bidistillée et séchés à l'étuve.

Tétrachlorure de Carbone CCl_4

On utilise du CCl_4 très pur, tel que le produit « R.P. pour analyses » ou produit « Merck pour chromatographie ». Le CCl_4 dit « pur » contient encore des impuretés qui même à l'état de traces gênent la formation du dithizonate de cuivre.

On récupère le CCl_4, après usage, en le lavant par SO_4H_2 concentré et pur jusqu'à décoloration complète. Après distillation sur chaux vive pour éliminer les traces d'acide et d'eau, le CCl_4 est prêt à resservir.

Solution stock de dithizone à 0,2 ‰

La dithizone commerciale contient en général des produits d'oxydation colorés en brun et solubles dans le solvant qui gêneraient au cours des dosages. Il faut donc les éliminer. Pour cela, on utilise la propriété qu'a la dithizone de passer en solution aqueuse en milieu alcalin, tandis que les produits d'oxydation restent dans le solvant organique. On en déduit le mode opératoire suivant :

On pèse environ 20 mg de dithizone, au préalable finement pulvérisée, que l'on dissout dans environ 40 ml de CCl_4, placés dans une ampoule à décantation de 150 ml environ. Il est nécessaire d'agiter fortement quelques minutes, car la dissolution de la dithizone n'est pas immédiate. Après dissolution complète, on ajoute environ 50 ml de NH_4OH N/5 purifiée. Après agitation, la majeure partie de la dithizone passée en solution dans la phase aqueuse la colore en rouge orangé, tandis que la phase tétrachlorique est vert brun. On transvase cette dernière dans une autre ampoule à décantation et on extrait une seconde fois la dithizone restante par environ 20 ml de NH_4OH N/5. La phase tétrachlorique, de couleur brune, contenant tous les produits d'oxydation de la dithizone, est éliminée ou récupérée pour être distillée après purification.

Les solutions ammoniacales réunies sont lavées trois ou quatre fois par 20 ml de CCl_4, afin d'enlever les dernières traces de produits d'oxydation de la dithizone. Au cours de cette opération, un peu de dithizone repasse en solution dans CCl_4 et est ainsi éliminée. La solution ammoniacale, après filtration sur filtre sans cendres

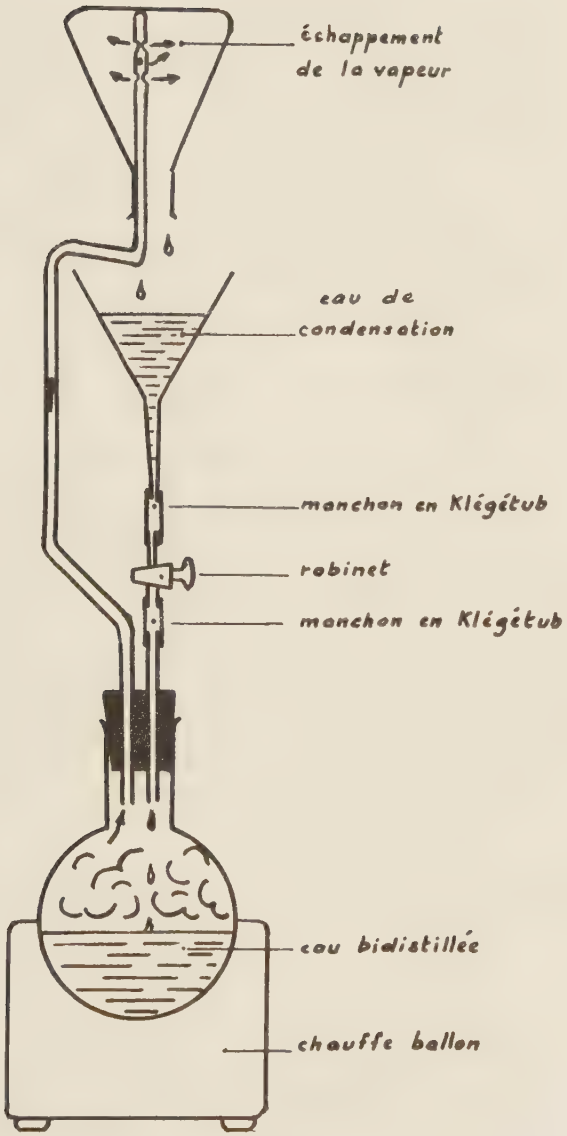


FIG. 5 . SCHÉMA DE L'APPAREIL UTILISÉ POUR LE RINÇAGE DE LA VERRERIE .

lavé, est acidifiée par HCl pur. La dithizone précipite. Elle est extraite par 50 ml environ de CCl_4, puis une seconde fois par une vingtaine de ml. Les solutions tétrachloriques de dithizone sont réunies et lavées trois ou quatre fois par 40 ml environ d'eau bidistillée ou mieux d'eau purifiée. Après filtration de la solution tétrachlorique de dithizone, on complète à 100 ml avec du CCl_4 et la solution, conservée à l'abri de la lumière et si possible à 0°C, est prête à l'emploi. Dans ces conditions, elle se conserve en bon état pendant près d'un mois. On peut le vérifier en agitant quelques ml de solution avec NH_4OH N/5. La phase tétrachlorique doit être incolore ou très légèrement colorée en brun.

Ammoniaque

L'ammoniaque R.P. est distillée dans un appareil en verre pyrex et recueillie dans de l' « eau purifiée ».

Acétate de Sodium

L'acétate de Sodium du commerce, même très pur, contient encore des impuretés en quantité appréciable, qu'il est indispensable d'éliminer. Pour cela, on agite la solution d'acétate avec quelques millilitres de solution de dithizone. Les dithizonates restent dans la phase tétrachlorique et sont rejetés. On renouvelle l'extraction jusqu'à ce que la solution de dithizone conserve sa couleur verte, ce qui indique l'absence de formation de dithizonates. Une partie de la dithizone passée en solution dans l'acétate est enlevée par des lavages répétés avec du CCl_4 jusqu'à ce que ce dernier reste incolore.

Eau purifiée

L'eau bidistillée contient encore quelques traces de métaux. On peut la purifier, comme l'acétate de sodium, par agitation avec quelques millilitres de solution de dithizone.

Solution étalon de cuivre

Elle est préparée à partir de cuivre électrolytique R.P. : 250 mg sont attaqués par 2 ml de NO_3H concentré R.P. Après dissolution, on ajoute 2 ml de SO_4H_2 concentré R.P. et on chauffe jusqu'à l'apparition de fumées blanches pour éliminer NO_3H. Par dilution avec de l'eau purifiée, on prépare une solution à 1 mg/l.

Extraction du cuivre et « colorimétrie »

1° *Etalonnage*

Dans une ampoule à décantation de 60 ml, on met successivement 1, 2, 3, ... 10 ml de solution de cuivre à 1 mg/l. On extrait le cuivre en agitant des portions successives de 0,5 à 1 ml de solution de

dithizone diluée au 1/2 ou au 1/3 suivant le cas, jusqu'à ce qu'une nouvelle portion de dithizone conserve sa couleur verte. La solution aqueuse est lavée par 1 ou 2 ml de CCl_4. Les extraits tétrachloriques réunis sont lavés par 10 ml de NH_4OH N/50 et filtrés, après décantation, sur un filtre lavé et humecté de CCl_4. La solution ammoniacale est lavée par 1 ou 2 ml de CCl_4 qui servent en même temps à laver le filtre. La solution tétrachlorique de dithizonate est complétée exactement à 10 ml par CCl_4.

La colorimétrie de la solution est faite immédiatement dans une cuve de 2 cm d'épaisseur aux environs de 5100 A°.

On construit ainsi la courbe d'absorption du dithizonate de cuivre, exprimée en densité optique, pour des quantités allant de 0 à 10 ou 12 μg de cuivre.

2° *Dosage*

On prélève, à partir de la solution provenant de la minéralisation, une prise d'essai contenant moins de 10 μg de cuivre, que l'on place dans une ampoule à décantation de 60 ml.

L'acidité est neutralisée en présence d'une goutte d'hélianthine (à 0,1 % dans l'eau purifiée), par de l'acétate de sodium 2 M, en s'arrêtant à la « chûte du rose » (pH 3,2).

Le cuivre est alors extrait par des portions successives de 0,5 à 1 ml de la solution stock de dithizone diluée. Il est important, pour la précision des résultats, d'effectuer les extractions successives avec des quantités décroissantes de dithizone de manière à terminer l'épuisement du cuivre sans excès important de dithizone en mélange avec les dithizonates. La phase aqueuse est lavée deux fois par 0,5 à 1 ml de CCl_4.

Les extraits tétrachloriques sont agités avec 10 ml de HCl N/100 pour se débarrasser du Zn. Après décantation de la phase tétrachlorique, la solution chlorhydrique est lavée une fois avec 0,5 à 1 ml de CCl_4.

L'excès de dithizone est éliminé par agitation de la phase tétrachlorique avec 10 ml de NH_4OH N/50.

Après décantation, la solution tétrachlorique est filtrée sur un filtre humecté de CCl_4. La solution ammoniacale est lavée deux fois par 0,5 à 1 ml de CCl_4 qui sert ensuite à laver le filtre.

Après complément à 10 ml par du CCl_4, on mesure aussitôt la densité optique.

Cette méthode permet de doser avec une précision de l'ordre de 2 % une quantité de cuivre égale ou supérieure à 1 μg.

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT DU CUIVRE DANS LE SOL ÉTUDE DE SON INFLUENCE SUR LA BIOLOGIE DE LA PLANTE

Au cours de ce chapitre, nous allons examiner les phénomènes susceptibles de donner quelques explications de la stérilite de ces sols dégradés. Nous envisagerons rapidement l'influence de divers facteurs pour montrer le rôle prépondérant joué par le cuivre.

GÉNÉRALITÉS SUR L'APPARITION DES SYMPTOMES

Nous avons déjà constaté que les accidents sur les végétaux n'avaient pas une répartition uniforme sur l'ensemble de la parcelle. Certaines parties semblaient épargnées, tandis que d'autres présentaient des caractères moins accusés.

La végétation dans la zone humide, notée (7) sur la fig. 1, dont le sol présente des caractéristiques voisines de celles de la terre témoin, n'est pas affectée par ces accidents. Il en est de même pour la bordure (8) ayant un sol analogue à celui du témoin, avec cependant un taux de matière organique relativement élevé. Par contre, dans l'ancienne zone à chiendent (6), les accidents, moins intenses que dans le reste de la parcelle, sont encore nettement visibles.

Nous allons rechercher quelles sont les relations pouvant exister entre l'intensité de ces signes morbides et les caractéristiques du sol.

De façon générale, nous observons, pour la parcelle étudiée, un certain parallélisme entre l'augmentation de l'intensité des signes morbides et l'état de dégradation croissant du sol; diminution de la capacité d'échange, pauvreté en bases et matière organique, acidification. La dégradation du sol est donc pour les types étudiés une condition nécessaire à l'apparition de ces accidents.

INFLUENCE DE L'ACIDITÉ

Etant donné les valeurs extrêmes, enregistrées dans la mesure du pH, on peut se demander quel est le comportement du végétal, notamment du système radiculaire, dans un tel milieu.

Nous avons entrepris un essai de végétation en pots, de blé (Blé d'Avril), sur un sol acidifié artificiellement. Après débasification d'une terre témoin (TT) à pH 7,1 par des quantités croissantes d'acide chlorhydrique dilué et lavage pour éliminer les ions Cl^-, nous avons obtenu des échantillons ayant les pH suivants :

A	TT	sans traitement :	pH 7,1
B	TT	amenée à	pH 6,4
C	TT	»	4,9
D	TT	»	4
E	TT	»	3,6

Nous avons ainsi constitué une série de six pots contenant pour les cinq premiers la terre témoin aux différents pH et pour le dernier de la terre provenant de la parcelle étudiée (TE), ayant un pH de 5,4 au moment de son utilisation.

Photo n° 2.
Influence de l'acidité sur le développement radiculaire.

TE	pH 5,4
A	pH 7,1
C	pH 4,9
D	pH 4
E	pH 3,6

La végétation du blé s'est poursuivie jusqu'au stade 4 feuilles. Comme le montre la photo n° 2, le développement radiculaire ne

commence à être affecté que dans le pot n° D, contenant la terre à pH 4. Pour un pH de 3,6, le développement radiculaire, bien que profondément modifié, n'est pas nul et on n'arrive jamais au cas extrême de réduction présenté par l'appareil radiculaire des plantules développées sur TE dont le pH est de 5,4 au moment de l'expérience.

INFLUENCE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

On a envisagé l'hypothèse d'une toxicité d'origine organique, notamment par les excrétions des racines de vigne. La densité radiculaire maximum se situant aux environs de 40 à 50 cm de profondeur, nous avons pensé qu'un échantillon de terre prélevé à ce niveau devait provoquer les symptômes décrits à un degré égal ou supérieur à ceux observés dans les échantillons de terre de surface.

Des essais de végétation en pots nous ont montré qu'il n'en était rien, bien au contraire. Le développement radiculaire s'effectue normalement et ne présente aucun signe maladif dans les échantillons prélevés à une cinquantaine de cm de profondeur.

Cette remarque permet de localiser la cause de ces accidents dans la partie superficielle du sol.

INFLUENCE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX

L'éventualité d'une toxicité d'origine minérale restait donc à démontrer. Le fait que de tels accidents soient toujours constatés après défrichement de vieilles vignes de *V. vinifera,* sur des sols acides, amène à incriminer en premier lieu les éléments étrangers apportés au cours de la culture de cette plante dans la lutte contre les maladies cryptogamiques. Les apports de soufre minéral sont partiellement responsables de l'acidification du sol, mais ne semblent pas jouer un rôle direct dans l'apparition des phénomènes de toxicité observés.

Il en est différemment en ce qui concerne les apports de cuivre. Les traitements à la « Bouillie Bordelaise » apportent en moyenne une dizaine de kg de cuivre à l'hectare et par an dans nos régions. Un calcul rapide montre qu'en ne considérant que la partie superficielle du sol (0-30 cm), l'enrichissement en cuivre annuel est de l'ordre de 2,75 ppm.

En effet, si on prend, comme densité du sol en place, la valeur moyenne 1,2, le poids de terre représenté par une épaisseur de 30 cm sur 1 ha sera de $0{,}3 \times 10^4 \times 1{,}2 = 0{,}36 \times 10^4$ t/ha. La quantité de cuivre apportée annuellement est de l'ordre de 10 kg/ha, ce qui donne un taux de : $\frac{10}{0{,}36 \times 10^7} = 2{,}77 \times 10^{-6}$ ou encore 2,77 mg

de Cu/kg de terre. Au bout de 75 ans, l'enrichissement moyen des 30 premiers centimètres, en admettant que la diffusion ne se fasse pas plus profondément, sera donc de l'ordre de $2{,}77 \times 75 \# 200$ mg de Cu/kg de terre.

C'est là une teneur moyenne pour un sol cultivé en vigne. Dans les régions à vocation essentiellement viticole comme la Champagne, où les nouvelles plantations sont établies sur l'emplacement d'anciens vignobles, on trouve des taux de cuivre bien supérieurs, sans pour cela observer d'accidents sur les plantes. Ceci montre que les différents types de sols, suivant leurs caractéristiques minéralogiques et chimiques, réagissent de façon particulière vis-à-vis des ions Cu^{++} apportés, réactions se traduisant sur la plante par l'absence ou la présence de symptômes de toxicité suivant les cas.

I. COMPORTEMENT DU CUIVRE DANS LE SOL

Nous avons déjà montré au cours du chapitre II l'état particulièrement dégradé au point de vue agrologique des sols provenant du défrichement de vieux vignobles établis sur des alluvions récentes. Dans un tel milieu, l'ion Cu^{++} n'a-t-il pas un comportement particulier susceptible d'entraîner les accidents spectaculaires précédemment décrits? C'est ce que nous allons essayer de démontrer.

Nous avons vu que le taux de cuivre apporté par la lutte anticryptogamique pendant la durée d'exploitation du vignoble était de l'ordre de 200 mg/kg de terre pour la parcelle étudiée, en supposant qu'il y ait accumulation dans la couche superficielle 0-30 cm.

Cuivre total

L'analyse, dans l'échantillon TE, terre de surface 0-20 cm, nous a donné un taux de cuivre total de l'ordre de 140 mg/kg. Un échantillon prélevé au même endroit, mais entre 50-60 cm de profondeur, n'en renferme plus que 18 mg/kg, soit un taux légèrement supérieur mais de même ordre que celui trouvé dans la terre témoin TT, soit 16 mg/kg.

Ces résultats montrent que, en ce qui concerne le type de sol étudié, la migration du cuivre vers la profondeur reste faible. Si la culture de la vigne est poursuivie pendant de nombreuses années, l'enrichissement de la zone travaillée peut devenir considérable.

Cuivre mobile

La teneur en cuivre total n'a qu'une importance secondaire dans la biologie de la plante. Dans les sols calcaires, par exemple, on n'observe aucun symptôme de toxicité, même pour des taux très élevés en cuivre, d'où la nécessité d'étudier la fraction mobile du sol.

Cuivre déplaçable par $ClNH_4$

Après agitation pendant 6 h de 10 g de terre fine dans 80 ml de $ClNH_4$ N (pH 4,5) et 24 h de contact, on centrifuge pour faire le dosage du cuivre sur la solution limpide surnageante.

Les quantités de Cu ainsi extraites sont les suivantes :

TE.....	25	mg/kg de terre
TT.....	0,2	mg/kg de terre
TE (50 cm).....	1,5	mg/kg de terre

Cuivre déplaçable par $(NO_3)_2Ca$

Le déplacement et l'entraînement du cuivre mobile est obtenu par du $(NO_3)_2Ca$ N/2 amené à pH 4,5. Après agitation de 500 g de terre TE pendant une heure avec 500 ml de $(NO_3)_2Ca$. On centrifuge pour doser le cuivre dans la solution limpide surnageante. On fait ainsi quatre extractions successives titrant respectivement 12,5, 7, 4,1, 3,5 mg/l. La quantité totale de cuivre ainsi extrait est de 12 mg pour un échantillon de 500 g, soit un taux de 24 mg/kg de terre. Ce résultat est comparable à celui obtenu par le déplacement avec $ClNH_4$, bien que les conditions d'extraction soient différentes.

Le taux de Cu, dans les extractions successives, va en décroissant, mais ne tend pas vers une limite nulle. Le déplacement par Ca++ du Cu++ engagé dans des combinaisons minérales ou organiques se fait avec équilibre.

Cette question mériterait une étude particulière, mais pour le sujet qui nous concerne, il nous suffit de savoir qu'une fraction importante de cuivre total est sous forme facilement déplaçable, tout en étant suffisamment lié pour résister par exemple au lessivage des eaux de pluie. Nous verrons en étudiant plus loin la solution du sol obtenue par la méthode de Schlœsing, que le taux de cuivre relativement élevé, 7 mg/l dans la première fraction, s'abaisse rapidement à 1 mg/l et au-dessous. Le cuivre ainsi éliminé est insignifiant par rapport à la quantité totale.

Ainsi s'explique son accumulation dans la partie superficielle du sol et la conservation d'une grande activité vis-à-vis de la plante.

II. INFLUENCE DU CUIVRE SUR LA BIOLOGIE DE LA PLANTE

Réactions de la plante dans les sols riches en cuivre mobile

Nous avons utilisé le végétal pour vérifier l'interprétation des analyses chimiques, en observant son comportement dans les différents milieux. C'est dans ce but que nous avons fait un essai de végétation en pots sur les échantillons de terre suivants :

TE,

TE lessivée par H_2O, en poursuivant le lessivage, après l'extraction de la solution du sol selon la méthode de Schlœsing,

TE traitée par $(NO_3)_2Ca$,

TT.

Les pots utilisés sont des béchers en verre pyrex de 250 ml à forme haute. L'essai a été conduit avec du blé, variété « blé d'avril », jusqu'au stade « 2 feuilles », à raison de cinq plantules par pot.

Les résultats obtenus sont illustrés par la photo n° 3. Nous avons constaté une amélioration sensible dans le développement du système radiculaire des plantules ayant végété dans la terre TE traitée au $(NO_3)_2Ca$, par rapport à celui observé dans l'échantillon TE. Les traitements au $(NO_3)_2Ca$ ont enlevé une fraction importante du cuivre facilement déplaçable. Il faut remarquer que le pH acide de cet échantillon de terre contribue à la réduction du développement radiculaire et rend la comparaison avec le développement radiculaire des plantules venues sur la terre témoin TT qui est neutre, difficile. Néanmoins, l'accroissement important constaté par rapport à TE indique que le cuivre « facilement déplaçable » correspond vraisemblablement à du cuivre « facilement assimilable » pour la plante.

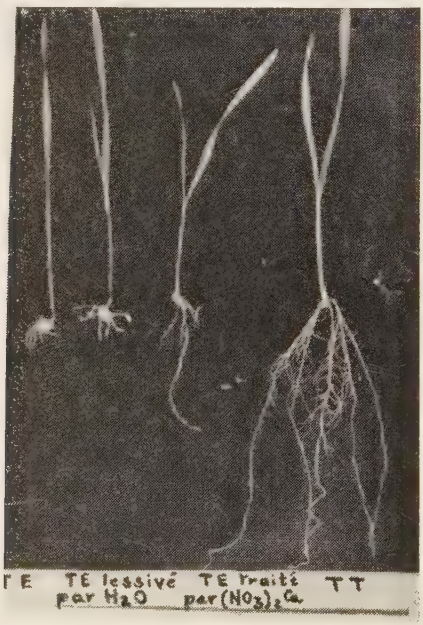


Photo n° 3.

Influence de divers traitements du sol sur le développement radiculaire.

Photo n° 4.

Influence de la profondeur du prélèvement dans TE sur le développement radiculaire.

Inversement, les racines développées dans TE lessivée par H_2O ont un développement presque aussi réduit que celles de TE, ce qui correspond bien aux résultats fournis par l'analyse. Le lessivage par l'eau est incapable d'éliminer le cuivre « assimilable » du sol.

Nous avons vu que les taux de cuivre « total » d'une part, et « déplaçable » par le $ClNH_4$ (N) d'autre part, passent respectivement de 140 à 25 mg/kg pour l'échantillon de surface TE et de 18 à 1,5 mg/kg pour l'échantillon TE (50) prélevé entre 50 et 60 cm de profondeur. Un essai dans des pots contenant les échantillons de terre suivants : TE, TE (50), TT, a montré que le développement radiculaire dans TE (50), compte tenu de l'acidité du sol, était comparable à celui du témoin TT, comme le montre la photo n° 4.

Cet essai montre, encore une fois, la relation étroite existant entre l'apparition des symptômes de toxicité et un taux élevé de cuivre facilement déplaçable dans le sol.

TENEUR EN CUIVRE DE LA PLANTE

La plante, se développant dans un sol riche en cuivre déplaçable, absorbe-t-elle des quantités importantes de cet élément, entraînant les modifications morphologiques observées ? C'est ce que nous allons essayer de préciser dans ce qui suit.

Le semis de blé dans des pots en zinc paraffinés, contenant environ 12 kg de terre sèche, a permis le prélèvement de plantules aux différents stades végétatifs en vue du dosage du cuivre dans la plante entière. Le taux de cuivre dans les grains de blé utilisés est de l'ordre de 35 mg/kg de matière séche.

C'est au stade plantule, une à deux feuilles, que la teneur en cuivre de la plante entière est la plus élevée : on a trouvé des taux de 200 mg et plus par kg de matière sèche pour les plantules développées sur TE. A la montaison la teneur en cuivre semble décroître considérablement. Elle est de l'ordre de 20 mg/kg, soit à peine deux fois plus que dans les témoins, 9 à 9,5 mg/kg.

Cette diminution du taux de cuivre dans la plante entière, tiges et racines, au cours de son développement, n'est qu'apparente et risque de conduire à des conclusions erronées. Si on considère le rapport pondéral Tige/Racines, des blés ayant poussé sur la terre TE, on s'aperçoit qu'il ne cesse de croître au cours du développement de la plante. En effet, le système radiculaire reste extrêmement réduit dans TE, tandis que l'appareil aérien prend un certain développement. Il en résulte que cette diminution du taux de cuivre sur la plante entière, peut correspondre, soit à un abaissement effectif de la teneur en cet élément des différents tissus au cours du développement, soit plus vraisemblablement à des taux respectifs sensiblement constants, mais différents dans la tige et les racines, l'appareil radiculaire étant alors beaucoup plus riche que la tige. Nous allons montrer au cours des prochains essais que c'est effectivement cette deuxième hypothèse qui se vérifie.

Nous avons effectué une série de cultures en pots dans des béchers en pyrex en utilisant la variété dite « Blé d'Avril ». On sème cinq grains, un au centre et quatre près de la paroi de façon à pouvoir suivre le développement des racines, dans les pots de 250 ml de capacité, numérotés 1, 2, 3, 4 et trois grains disposés contre la paroi, dans ceux de 150 ml, numérotés 5, 6, 7, 8.

Les pots 1 et 8 sont remplis avec la terre témoin TT après avoir, comme d'habitude, disposé dans le fond du bécher une couche de 1 cm d'épaisseur de sable siliceux, dans laquelle débouche un tube de verre permettant l'introduction de solutions nutritives ou d'eau sans tassement de l'échantillon.

Les pots 2 et 5 sont remplis avec la terre TE de surface, et le pot n° 6, avec de la terre prélevée à 50 cm de profondeur TE (50).

Dans les pots 3, 4, 7, nous avons placé à la partie inférieure, une couche de terre riche en cuivre TE, surmontée par une couche de terre témoin TT, les deux types de terre étant séparés par une pellicule de sable siliceux. Les rapports entre l'épaisseur des deux couches de terre TT/TE sont les suivants :

1/2 dans le pot n° 4,
1/2 dans le pot n° 7,
1/3 dans le pot n° 3.

Une semaine après le semis, on peut faire les observations suivantes :

Dans les pots 1 et 8 contenant la terre témoin TT, quelques racines

ont déjà atteint le fond des vases, et les coléoptiles vont laisser échapper la première feuille.

Dans les pots 2 et 5 remplis avec la terre TE, le système radiculaire est extrêmement réduit et les coléoptiles n'ont que 2 à 3 cm de longueur.

Dans le pot n° 6, TE (50), les racines ont atteint le fond du vase et les coléoptiles sont comparables à ceux des témoins TT.

Dans les pots 3, 4, 7, contenant les deux types de sols superposés TT/TE, les coléoptiles sont comparables à ceux des témoins TT. L'appareil radiculaire est normal et bien développé dans la couche supérieure constituée par la terre témoin TT, mais dès qu'il pénètre dans la couche inférieure TE, où il ne s'enfonce pas à plus de 1 ou 2 cm, sa croissance est stoppée. Les racines sont alors affectées par des courbures anormales, s'épaississent, prennent un aspect coralloïde caractéristique et la densité de leurs poils absorbants augmente considérablement.

L'essai est interrompu au bout d'un mois. Les plantules sont dépotées avec soin, de manière à conserver le système radiculaire complet. Ce dernier est lavé à l'eau distillée, après l'avoir préalablement débarrassé de toutes traces de particules terreuses.

Nous avons pris un soin tout particulier des pots n° 4 et 7 au moment de leur dépotage. La pellicule de sable, située entre les deux types de sols TT et TE, a permis la séparation des racines développées dans chacun d'eux.

Nous avons fait trois parts de l'appareil radiculaire des plantules développées dans le pot n° 4 :

a) Les racines développées dans la couche supérieure TT;

b) La partie des racines située encore dans TT, mais juste au-dessus de la zone de séparation des deux couches de sols;

c) Les racines développées dans TE.

Les dosages de cuivre dans la plante ont donné les résultats mentionnés dans le tableau VI.

TABLEAU VI

Taux de cuivre dans les différentes parties de la plante

NATURE ET N° DES POTS		TAUX DE Cu EN MG/KG DE M.S. DANS LES TIGES ET FEUILLES	LES RACINES		OBSERVATIONS
TT	1	19	56		
TT	8	17,6	58,5		
TE	2	35	714		
TE	5	32	548		
TE (50)	6	21	174		
TT/TE	3	17	110	(1)	Dans l'ensemble du système radiculaire.
»	7	21	77	(2)	Racines développées dans TT.
			460	(3)	Racines développées dans TE.
»	4	19	72	(4)	Racines développées dans TT.
			120	(5)	Racines situées dans TT à la limite de TE.
			440	(6)	Racines dans TE.

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ces résultats, partiellement publiés dans une note antérieure [17], nous permettent de tirer les enseignements suivants :

1° Le taux de cuivre dans l'appareil radiculaire est constamment plus élevé que dans les tiges et feuilles.

2° Les variations du taux de cuivre dans les tiges et feuilles, en fonction de la teneur en cuivre déplaçable du sol, restent relativement faibles. Les plantules des pots 3, 4, 7, contenant les deux types de sols superposés TT/TE, de même que celles du pot TE (50), ont une teneur en cuivre de l'appareil aérien comparable à celui des plantules des pots témoins TT. Ce n'est que dans les pots contenant uniquement la terre TE, très riche en « cuivre déplaçable », que les plantules contiennent, dans leurs tiges et feuilles, près de deux fois plus de cuivre que celles développées sur la terre témoin TT.

3° Au contraire, il semble que le taux de cuivre dans l'appareil radiculaire soit étroitement lié au taux de cuivre déplaçable dans le sol.

En effet, les racines des plantules développées dans TE (50) titrant 1,5 mg/kg de cuivre déplaçable, contiennent déjà presque trois fois plus de cuivre que celles développées dans la terre témoin TT titrant 0,2 mg/kg, tandis que celles développées dans TE, titrant 25 mg/kg, en contiennent dix fois plus.

L'examen des résultats relatifs aux pots 3, 4, 7, contenant les deux types de sols superposés, nous apporte quelques précisions sur la migration du cuivre dans la plante.

Le taux de cuivre, dans l'appareil radiculaire complet, comprenant les deux types de racines, celles développées dans TT et celles développées dans TE, est de l'ordre de 110 à 140 mg/kg, soit environ deux fois plus important que celui des racines des plantules témoins.

La partie des racines, située dans la terre témoin TT, renferme un taux de cuivre comparable à celui trouvé dans les plantules témoins, bien que supérieur de 20 %. La teneur en cuivre de la partie des racines qui se sont développées dans TE est encore près de dix fois supérieure à celle des témoins.

De ces observations, on peut conclure que la migration du cuivre dans la plante, et en particulier dans l'appareil radiculaire, est soumise à un système régulateur efficace. Il semble que l'excès de cuivre, extrait du sol par les poils absorbants, soit fixé, pour sa plus grande partie, par l'écorce et ne pénètre pas ou peu dans les faisceaux libéro-ligneux de la plante; sa migration à l'intérieur même de la racine reste faible ou nulle.

Nous avons trouvé pour le pot n° 4, dans les racines situées à la limite de séparation des deux types de sols mais encore dans la terre témoin TT, 120 mg de cuivre par kg de matière sèche. Ce taux, bien qu'étant plus élevé que celui observé dans la partie des racines situées dans la terre témoin, montre, cependant, une chute brutale par rapport à celui observé dans la partie des racines développées dans TE. Cette chute serait encore plus spectaculaire, si l'eau, nécessaire au maintien d'une humidité convenable dans le sol, au cours de la croissance des plantes, avait été apportée à la surface des pots plutôt qu'à leur base. Il est probable que la circulation constamment ascendante, par suite des phénomènes d'évaporation, a provoqué des remontées de cuivre vers la surface et enrichi légèrement la couche inférieure de TT en cet élément. Ceci peut expliquer que les racines situées à la partie inférieure de la couche de terre TT contiennent plus de cuivre que celles de la partie moyenne et supérieure.

D'autre part, l'aptitude des racines intoxiquées à donner de nouvelles racines montre que les cellules du péricycle, initiales de ces radicelles, sont restées fonctionnelles.

Des plantules, ayant végété plusieurs semaines dans TE et présentant un système radiculaire particulièrement atrophié, sont transplantées dans la terre témoin TT. Au bout de quelques jours, de nouvelles racines se développent et la plante pousse normalement.

On peut en déduire que les cellules du péricycle ont conservé leur vitalité. Au contraire, l'endoderme ou les cellules plus externes semblent jouer le rôle de filtres pour le cuivre, dont elles accumulent l'excès jusqu'à saturation de leur capacité.

C'est, pour la plante, une réaction naturelle de défense destinée à lui permettre de survivre dans un milieu impropre à son développement.

Dans ces conditions, l'expression « toxicité cuprique » apparaît mal choisie si l'on donne au terme toxique son sens éthymologique de poison. En effet, si la cause, en l'occurrence l'excès de cuivre, qui ralentit ou perturbe le développement du système radiculaire disparaît, ce dernier reprend sa vigueur et la croissance de la plante redevient normale. De plus, nous avons noté que la germination du blé n'est pas affectée même par des doses relativement élevées de cuivre.

L'expression « toxicité du cuivre » est couramment utilisée par tous les auteurs, c'est pourquoi nous l'employons tout au long de ce travail.

CHAPITRE V

DÉMONSTRATION DE LA TOXICITÉ DU CUIVRE

Des expériences qui précèdent, nous avons acquis la conviction du rôle toxique joué par le cuivre mobile du sol sur la végétation. Pour une démonstration rationnelle et irréfutable de cette toxicité, il faudrait qu'après avoir enlevé sélectivement au sol tout ou partie de ce cuivre mobile sans toucher aux autres éléments et sans apporter de modifications aux autres facteurs, le développement des végétaux se fasse normalement. La démonstration du rôle toxique de cet élément serait alors établie avec certitude.

Dans l'état actuel de nos connaissances, un tel mode opératoire paraît difficilement réalisable.

Une autre solution consisterait à faire subir à la terre témoin TT, par l'action combinée du soufre et du SO_4Cu, une dégradation analogue à celle subie par la terre toxique TE. Mais là encore les conditions réalisées au laboratoire ou en serre sont trop différentes de celles qui régnent en plein champ et, de plus, la durée de cette évolution ne saurait être de plusieurs dizaines d'années comme c'est le cas dans la nature. Les résultats obtenus ne pourraient être rigoureusement comparables et deviendraient par là même critiquables.

Plutôt que de travailler sur le sol lui-même, nous avons alors recherché un support plus simple permettant le contrôle des opérations pratiquées, mais dont les relations avec le sol soient suffisamment étroites, pour que les résultats obtenus sur ce matériel soient toujours valables dans le milieu naturel. La solution du sol, obtenue par la méthode de Schlœsing, semble répondre à ces conditions. On sait que l'alimentation de la plante, tout au moins pour une large part, est assurée par l'intermédiaire des sels minéraux dissous dans la solution du sol. Le rôle joué par les gels colloïdaux, ainsi que l'action de contact des racines sur les particules minérales, notamment par l'intermédiaire de leurs excrétions racinaires, ne sont certes pas négligeables; mais la nature et la quantité des sels dissous mis à la disposition de la plante dans la solution du sol influencent directement sa biologie et reflètent fidèlement le potentiel de fertilité du sol.

ÉTUDES SUR LA SOLUTION DU SOL

Technique utilisée pour obtenir la solution du sol

La méthode suivie pour recueillir la solution du sol est celle préconisé par Schlœsing [18]. Dans une cloche à vide de 25 cm de diamètre et de 20 cm de hauteur, où le robinet rodé amovible est remplacé par un bouchon en caoutchouc traversé d'un tube de verre destiné à laisser écouler la solution du sol, nous mettons 9 kg de terre fine, séchée à l'air, passant au tamis à maille de 2 mm. Le drainage de la solution, dans la partie inférieure de la cloche, est assuré par une couche de laine de verre arrivant au contact du sol par l'intermédiaire d'une feuille de papier filtre.

Après avoir tassé convenablement la terre, on dispose en surface une feuille de papier filtre sur laquelle on fait arriver un débit d'eau très lent, de manière à imbiber toute la masse de terre de façon homogène, jusqu'à une valeur proche de la saturation.

Après un temps de contact de l'ordre de 24 heures, on rétablit à nouveau un débit d'eau régulier et très lent sur la feuille de papier filtre, pour déplacer la solution du sol. Etant donné l'état structural particulièrement dégradé de la terre étudiée (TE), ce déplacement est très lent. Le débit est de l'ordre de 20 ml/heure. C'est la première fraction de 200 ml de solution recueillie que nous utiliserons dans la suite de notre travail en tant que solution du sol.

En poursuivant le lessivage de l'échantillon de terre par l'eau distillée, nous avons constaté :

1° le passage d'argile dans la solution du sol; cette défloculation se produisant quand on a déjà recueilli 700 ou 800 ml de solution;

2° un certain arrangement des particules, dans la masse de terre, en fin de lessivage, communiquant à cette dernière des propriétés rhéologiques caractéristiques.

L'étude de ces propriétés physiques n'a pas été poursuivie dans ce travail, mais elle joue probablement un rôle important dans les phénomènes de « battance » observés sur les sols de boulbènes.

Composition de la solution du sol

Nous n'avons pas fait l'analyse complète de la solution du sol, seules nous intéressaient l'acidité et la teneur en cuivre.

Les premières fractions ont un pH analogue ou supérieur de quelques dixièmes d'unité à celui trouvé dans le sol avec l'eau distillée. Il est de l'ordre pour TE de 4,2 à 4,5. Cette acidité diminue au fur et à mesure du lessivage.

La teneur en cuivre des premières fractions de la solution du sol, de l'ordre de 5 à 10 mg/l, varie suivant les conditions opératoires réalisées pour l'obtenir.

En solution nutritive, la toxicité du cuivre commence déjà à se manifester pour des teneurs inférieures à 1 mg/l. Il fallait donc s'attendre à ce que le développement de plantules sur la solution du sol de TE présente des symptômes de toxicité marqués.

ÉTUDE DE LA GERMINATION ET DES PREMIERS STADES DE DÉVELOPPEMENT DU BLÉ EN MILIEU LIQUIDE

Technique expérimentale

Nous avons utilisé des boîtes de Pétri de 10 cm de diamètre, rincées à l'eau distillée après un lavage soigneux. Dans le fond de la boîte est disposée une rondelle de papier filtre Durieux de même diamètre, sur laquelle on dispose les grains de blé, la gemmule dirigée vers le haut. On apporte 10 ml de solution, dont une partie sert à imprégner le papier. Ce système a l'avantage de ne pas gêner la respiration des grains de blé qui sont au contact de la solution sans y être immergés.

Les boîtes de Pétri, munies de leur couvercle, sont placées dans une étuve bactériologique, à une température de 24°C, pour une durée de trois, quatre ou cinq jours.

Nous avons vu que les symptômes de toxicité cuprique observés en plein champ se traduisent essentiellement par un retard et un certain nanisme dans le développement des plantes et surtout par un système radiculaire particulièrement atrophié. La racine est beaucoup plus sensible à l'élévation du taux de cuivre dans le milieu nutritif que l'appareil aérien. Cette réduction du système radiculaire nous a servi de critère pour la mesure du degré de toxicité du cuivre dans la solution.

La mesure pratique de la longueur du coléoptile et des racines de chaque plantule est effectuée en appliquant les éléments de la plante, tige ou racines, sur une feuille de papier millimétré. On détermine ainsi la longueur moyenne du coléoptile et de l'appareil radiculaire des plantules de chacun des pots, développés dans des solutions de concentration connue.

Au cours des différents essais que nous allons exposer, nous avons utilisé comme matériel végétal du blé alternatif dit « Blé d'Avril ».

Premier essai : Germination et développement des plantules dans les solutions du sol.

Dans une première série d'essais, nous avons étudié le comportement des plantules dans les solutions suivantes :

1. Eau distillée;
2. Solution du sol obtenue à partir de TT (TT) ;
3. Solution du sol obtenue à partir de TE (TE titrant 3,1 mg/l de Cu) ;

4. Solution du sol de TE (TE conc.). Cette solution est obtenue en prenant 30 ml de solution du sol de TE que l'on ramène à 10 ml par évaporation au bain-marie: la concentration en cuivre est alors de 9,3 mg/l environ.

Les boîtes, contenant huit grains de blé chacune, sont mises en étuve à 23°C environ. La durée de l'expérience est de cinq jours.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau VII.

TABLEAU VII

Résultats relatifs au premier essai

NATURE DES SOLUTIONS	NOMBRE DE GRAINS GERMÉS SUR 8	LONGUEUR MOYENNE APPROXIMATIVE PAR PLANTULE EN MM		% DE M.S. DANS		TAUX DE Cu DANS LA RACINE EN MG/KG DE M.S.
		SYSTÈME RADICULAIRE	COLÉOPTILE	LA RACINE	LE COLÉOPTILE	
Eau. . . .	7	200 à 250	50	8,16	11,3	51
TT. . . .	6	200 à 250	50	8,82	11,0	40
TE.	7	30	30	14,9	12,8	520
TE Conc	8	8	20	20,0	16,9	1 840

Des résultats fournis par cette expérience, nous pouvons déjà tirer les enseignements suivants :

1° La solution du sol provenant de la terre riche en cuivre (TE) reproduit sur les plantules de blés les accidents constatés en pleine terre. La concentration de cette solution, en élevant le taux de matières minérales et en particulier celui du cuivre, accentue encore les symptômes de toxicité.

La photo n° 5 permet d'apprécier l'importance des phénomènes relatés.

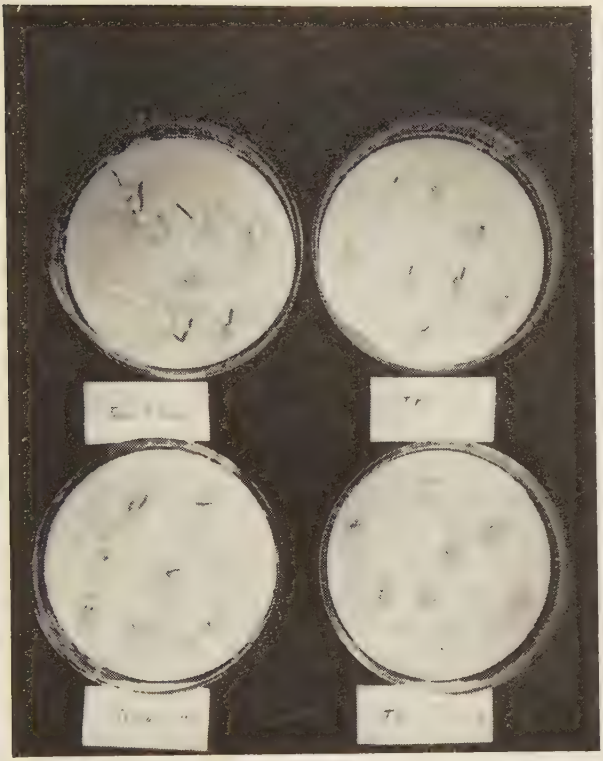


PHOTO N° 5.
1er essai : Germination du blé sur les solutions du sol de TE et TT.

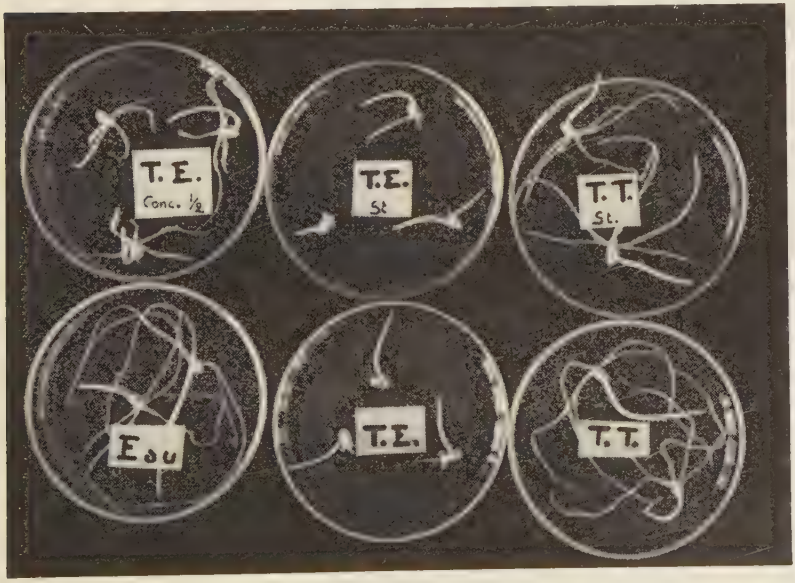


PHOTO N° 6.
2e essai : Germination du blé sur les solutions du sol stérilisées de TE et TT.

2° La faculté germinative n'est nullement affectée par le taux élevé de cuivre dans la solution.

3° Bien qu'approximative, la mesure de la longueur moyenne par plantule du coléoptile et du système radiculaire montre que l'action dépressive du cuivre est beaucoup plus importante sur la racine que sur la tige. Alors que la longueur du coléoptile est réduite sensiblement de moitié pour le taux le plus élevé en cuivre, pour cette même teneur, le système radiculaire est complètement atrophié. Ceci montre qu'il ne s'agit pas d'un simple retard dans le développement général, puisque le coléoptile s'est relativement bien développé, mais d'une action dépressive, s'exerçant essentiellement sur le système radiculaire.

4° Le dosage du cuivre dans les racines des plantules développées dans les quatre types de solutions révèle une teneur normale en cet élément pour celles provenant de la solution du sol de TT et de l'eau distillée. La teneur en cuivre de celles développées dans la solution du sol (TE) est dix fois plus forte que la normale; dans la solution « TE concentrée », on atteint la valeur extrême 1 800 mg/kg de matière sèche. Sans vouloir étudier le comportement physiologique de la racine, vis-à-vis du cuivre en solution, il nous semble cependant intéressant de souligner son accumulation au niveau de ce tissu.

5° Nous avons remarqué, et ceci au cours de plusieurs essais, que le taux de matière sèche dans les tiges et plus particulièrement dans les racines augmente d'autant plus que le milieu nutritif est plus riche en cuivre.

Deuxième essai : Germination et développement de plantules sur solutions du sol stérilisées.

L'examen microscopique d'une coupe de racine atrophiée provenant d'une plantule ayant poussé dans la terre TE, montre une hypertrophie des cellules situées au-dessous de l'assise pilifère, et leur invasion par de nombreuses bactéries. Dans ces conditions, on peut se demander si l'infection bactérienne est à l'origine des anomalies morphologiques observées sur les racines, ou bien si au contraire elle est la conséquence de l'état déficient de la plante se développant dans un milieu toxique.

Les essais que nous relatons apportent quelques précisions à ce sujet.

Dans une série de six boîtes de Pétri, nous avons mis à germer trois grains de blé par boîte, en étuve à 22-23°C, sur les solutions suivantes :

1. Eau distillée;
2. Solution du sol de TE;
3. Solution du sol de TE diluée au 1/2 avec de l'eau distillée;

4. Solution du sol de TT;
5. Solution du sol de TE stérilisée à 130°;
6. Solution du sol de TT stérilisée à 130°.

L'expérience est poursuivie pendant quatre jours. La photo montre que la stérilisation ne change pas l'allure des symptômes de toxicité.

Nous remarquons de plus que les plantules de la boîte 3 ayant germé dans la solution du sol de TE diluée au 1/2 ont un système radiculaire dont le développement, bien que plus réduit que celui des témoins (eau et solution du sol de TT), est cependant beaucoup plus important que celui des plantules développées dans TE. Si l'atrophie du système radiculaire était due à une attaque de microorganismes, ce n'est pas une dilution au 1/2 de la solution qui diminuerait sa virulence dans de telles proportions.

La stérilisation des solutions du sol ne diminuant pas la gravité des symptômes, il faut bien admettre que la toxicité observée n'est pas causée « directement » par l'infection microbienne.

Troisième essai : Influence de concentrations en Cu décroissantes, obtenues par dilution de la solution du sol TE, sur le développement de plantules.

La solution du sol utilisée, titrant 14 mg de Cu/l, nous avons fait les dilutions nécessaires pour obtenir les concentrations suivantes : 14, 7, 4,2, 2,8, 1,4, 0,95, 0,35 mg/l.

Dans chaque boîte de Pétri, garnie d'une rondelle de papier filtre, humectée par 10 ml de solution, nous avons disposé huit grains de blé, de taille sensiblement égale. Nous avons constitué ainsi une série de huit boîtes contenant des solutions dont le titre en cuivre varie de 14 à 0 mg/l (traces) pour la dernière boîte, humectée par de l'eau distillée.

Les boîtes sont mises dans l'étuve à 24°C. Au bout de quatre jours, la mensuration de la longueur des tiges et racines de chaque plantule nous a donné les résultats rapportés dans le tableau VIII.

Les courbes, voir fig. 6, représentant la longueur moyenne par plantule du système radiculaire et du coléoptile en fonction de la teneur en cuivre de la solution fournissent les renseignements suivants :

1° La concentration limite en cuivre, au delà de laquelle on constate un effet dépressif, se situe au-dessous de 0,9 mg/l pour la racine, tandis que pour la tige il faut dépasser 1,5 mg/l pour que soit sensible la réduction de développement dans les conditions de l'expérience.

TABLEAU VIII

Influence du cuivre sur le développement des plantules de blé

BOÎTE N°	CONCENTRATION EN Cu DE LA SOLUTION EN MG/L	LONGUEUR MOYENNE PAR PLANTULE EN MM	
		RACINE	COLÉOPTILE
1	14	16	17,5
2	7	40	24,7
3	4,2	74	33
4	2,8	121	35
5	1,4	165	42
6	0,95	198	41,3
7	0,35	227	43,4
8	0 (traces)	215	41

La toxicité est donc plus marquée sur le système radiculaire que sur la tige.

Quatrième essai : Etude de l'influence de concentrations en cuivre croissantes :

1° par prélèvement sélectif d'une partie du cuivre de la solution du sol TE;

2° par dilution de cette solution du sol;

3° par préparation de solutions de cuivre dans l'eau de même titre que les précédentes.

Première série : Prélèvements sélectifs partiels de cuivre dans la troisième fraction de la solution du sol TE.

Les trois premières fractions, de 200 ml chacune, de la solution du sol TE, obtenues suivant la technique préconisée par SCHLŒSING, titrent respectivement :

fraction 1 : 7,7 mg/l,
fraction 2 : 4,25 mg/l,
fraction 3 : 2,15 mg/l.

Sachant que 1 ml de la solution tétrachlorique de dithizone complexe 13,5 μg de cuivre, nous traitons, après les avoir amenés à pH 3 par des traces de NO_3H, en présence de méthyl orange, 20 ml de solution du sol TE (fraction n° 3) par 3,1 ml de solution de dithizone.

Nous prélevons ainsi $3{,}1 \times 13{,}5 = 41{,}85$ μg de cuivre dans les 20 ml de solution qui en contenaient $2{,}15 \times 20 = 43$. Il reste donc $43 - 41{,}85 = 1{,}15$ μg de cuivre dans les 20 ml, ce qui donne une solution A_1 titrant environ $\frac{1{,}15}{20} = 0{,}05$ mg/l.

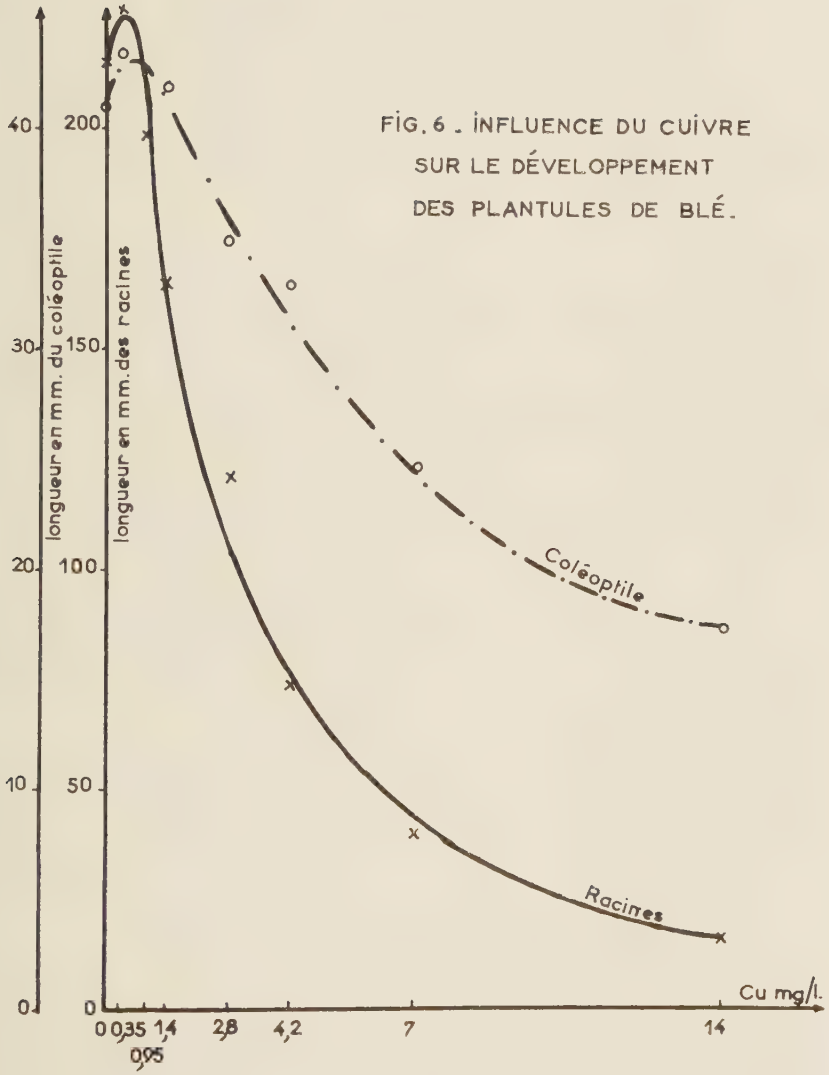


FIG. 6 . INFLUENCE DU CUIVRE SUR LE DÉVELOPPEMENT DES PLANTULES DE BLÉ.

La solution A_1, soigneusement lavée par CCl_4 afin d'éliminer les dithizonates de cuivre formés, ainsi que les traces de dithizone passées en solution, est filtrée sur papier Durieux lavé. Cette opération permet de séparer de la solution les fines gouttelettes de CCl_4 qui restent ainsi sur le filtre.

Après l'avoir ramenée à son pH initial (pH 5) par des traces de NH_4OH en présence d'une goutte de rouge de méthyl, la solution A_1 est chauffée à 90°C pour chasser les dernières traces de CCl_4.

Deux autres prises d'essais de 20 ml de solution du sol (fraction 3) traitées dans les mêmes conditions par 2,44 et 1,70 ml de solution de dithizone donnent les solutions B_1 et C_1 titrant respectivement 0,5 et 1 mg/l de cuivre.

Deuxième série : Par dilution avec de l'eau distillée des premières fractions de la solution du sol TE, nous préparons les solutions A_{11}, B_{11}, C_{11}, titrant respectivement 0,05, 0,5 et 1 mg/l de cuivre.

Afin que les séries I et II soient comparables, les solutions du sol qui ont été diluées ont reçu également 0,2 ml de NO_3H N/50 + une goutte de méthyl orange et 0,2 ml de NH_4OH N/50 + une goutte de rouge de méthyl.

Les solutions D, E, F, titrant respectivement 2,15, 4,25 et 7,7 mg/l, sont obtenues en prenant directement les fractions 3, 2 et 1 de la solution du sol.

Troisième série : Nous avons préparé les solutions A_{111}, B_{111}, C_{111}, D_{111}, E_{111}, F_{111}, titrant respectivement 0,05, 0,5, 1, 2,15, 4,25 et 7,7 mg/l de cuivre, par dilution dans l'eau distillée de solutions de SO_4Cu. Le pH de chaque solution est amené à 5 par des traces de NH_4OH en présence de rouge de méthyl.

Dans les trois séries d'essais, chaque boîte contient six grains de blé, la gemmule dirigée vers le haut, et disposés sur une rondelle de papier filtre Durieux imbibée par 10 ml de solution.

Les boîtes sont mises à l'étuve à 24°C et la durée de l'expérience est de quatre jours.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau IX.

TABLEAU IX

Influence du cuivre sur le développement radiculaire

COOCENTRATION DES SOLUTIONS En Cu - mg/l		LONGUEUR MOYENNE, PAR PLANTULE, DU SYSTÈME RADICULAIRE EN MM		
		Série I	Série II	Série III
A	0,05	203,5	185,5	166
B	0,5	234	187	177
C	1	164	165	139
D	2,15	145		89
E	4,25	59		64
F	7,7	16		—

Le traitement de la solution du sol par la dithizone permet d'enlever sélectivement le cuivre sans toucher pratiquement aux autres cations dans les conditions de pH réalisées pour son extraction, sauf peut-être pour le zinc dont une partie risque d'être éliminée en même temps que le cuivre.

Si nous comparons le développement du système radiculaire des séries I, II, III (dans les trois premières concentrations A, B, C) nous constatons, sinon une identité dans les résultats en valeur absolue, des variations se faisant dans le même sens. Le développement maximum se situe pour l'expérience présente vers 0,5 mg/l. L'effet dépressif du cuivre commence à être sensible dans les trois séries à la concentration de 1 mg/l et s'accentue pour les teneurs supérieures.

Nous pouvons donc conclure que l'élimination de l'excès de cuivre dans la solution du sol TE fait disparaître les symptômes de toxicité et permet un développement normal à la plantule.

Si, pour un même taux de cuivre, les résultats diffèrent légèrement d'une série à l'autre, par suite peut-être de différences dans les concentrations en sels dissous ou en acidité, il n'en reste pas moins que les variations de longueur du système radiculaire en fonction du taux croissant de cuivre restent comparables dans les trois séries, ce qui montre bien que l'excès de cuivre est le principal responsable de l'atrophie de la racine.

CHAPITRE VI

CONDITIONS DE LA PHYTOTOXICITÉ DU CUIVRE ET EXPÉRIMENTATION AU CHAMP

CONDITIONS DE LA PHYTOTOXICITÉ DU CUIVRE DANS LES SOLS

Teneur en cuivre du sol

D'après les résultats obtenus ou recueillis, il semble illusoire de vouloir fixer pour le taux de cuivre total dans un sol, une limite au delà de laquelle les symptômes de toxicité seraient susceptibles de se manifester. Certains sols peuvent contenir plus de 400 mg/kg de terre de Cu total, tels ceux des vignobles champenois, sans dommages pour la végétation qu'ils portent. D'autres, au contraire, et c'est le cas étudié, sont pratiquement stérilisés avec 140 mg/kg de terre.

Bien plus valable nous semble la considération des propriétés chimiques de la solution du sol. Elle reflète assez fidèlement les conditions du milieu dans lequel les racines s'alimentent pour qu'il soit possible d'y fixer un taux limite en cuivre au delà duquel le développement des plantes est affecté. A la suite des expériences que nous avons faites, il semble qu'une concentration supérieure à 1 mg/l dans la solution du sol amène nécessairement des accidents sur les végétaux. Ceci est d'ailleurs conforme à la logique. Nous savons que le rabougrissement du système radiculaire est déjà notable en solutions nutritives pour une teneur de 1 mg/l, à plus forte raison dans une terre dont la solution du sol, qui n'en est qu'un reflet appauvri, atteint ou dépasse cette concentration. En effet, la capacité d'absorption de la racine ne se limite pas aux substances minérales dissoutes dans la solution du sol, mais porte aussi sur les colloïdes argilo-humiques et même sur les fragments minéraux.

Acidité

Les accidents, tels que ceux que nous avons exposés au début de ce travail, ne se rencontrent jamais dans les sols neutres ou

alcalins; le cuivre s'y trouve fixé sous des formes insolubles et inaccessibles ou très peu par la plante, d'où l'absence de toxicité, même pour des taux importants de cuivre total dans le sol.

Dans les sols d'alluvions étudiés, subissant l'influence du lessivage, le départ des bases amène une dégradation des propriétés physiques et chimiques et plus particulièrement une acidification notable. Quand le pH devient inférieur à 5,5-5,3 et si le sol contient suffisamment de cuivre total, les plantes qui s'y développent présentent des symptômes de toxicité cuprique d'autant plus marqués que l'acidité est plus importante.

Effectivement, en considérant la courbe de solubilité de l'hydroxyde de cuivre en fonction du pH (fig. 7) on constate que sa précipitation commence vers pH 5 avec formation de sels basiques : elle n'est pratiquement totale, sous forme de $Cu(OH)_2$, que pour des valeurs nettement supérieures du pH, de l'ordre de 6,5 à 7.

Dans le sol, les mécanismes de fixation ou de libération du cuivre, engagé dans des combinaisons minérales ou organo-minérales encore peu étudiées, dépendent de trop de facteurs pour que les lois simples établies à partir de solutions parfaitement connues puissent s'appliquer intégralement. Leur connaissance permet cependant de prévoir que le taux de cuivre dans la solution du sol, tout au moins sous forme d'ions Cu^{++} et d'ions complexes du cuivre assez peu condensés, ne saurait être élevé tant que son pH, reflet de celui du sol, ne descend pas au-dessous de 5,5.

Nous savons que cette toxicité cuprique ne se manifeste jamais dans les sols calcaires, en raison vraisemblablement de leur pH neutre ou alcalin; mais il nous a semblé prudent de vérifier l'influence des ions Ca^{++} que l'on trouve en abondance dans les solutions de tels sols, sur l'intensité de cette toxicité.

A cette fin, nous avons réalisé l'expérience ci-dessous. Dans des béchers en pyrex, suivant la technique décrite au cours de ce travail, nous avons semé du blé, à raison de trois grains par pot, sur les échantillons de terre suivants :

pot n° 1 : Terre TT,

pot n° 2 : Terre TE,

pot n° 3 : Terre TE + CO_3Ca à la dose de 4 m.éq. de Ca^{++}/kg de terre,

pot n° 4 : Terre TE + SO_4Ca à la dose de 4 m.éq. de Ca^{++}/kg de terre,

pot n° 5 : Terre TE + Cl_2Ca à la dose de 4 m.éq. de Ca^{++}/kg de terre,

pot n° 6 : Terre TE + $(NO_3)_2Ca$ à la dose de 4 m.éq. de Ca^{++}/kg de terre,

pot n° 7 : Terre TE + CO_3K_2 à la dose de 4 m.éq. de K^{+}/kg de terre.

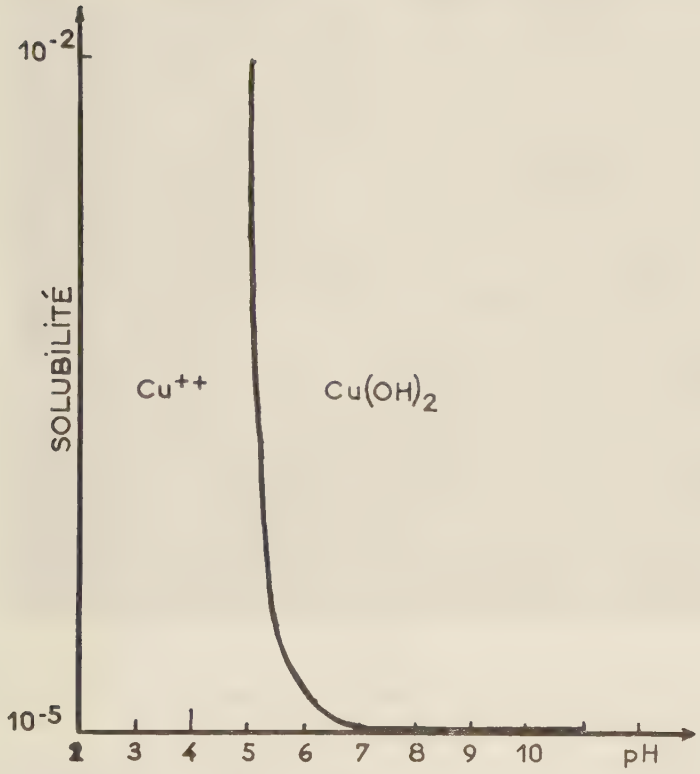


FIG 7 SOLUBILITÉ APPARENTE DE L'HYDROXYDE DE Cu EN FONCTION DU pH.

(D'après G. CHARLOT : "Théorie et méthode nouvelle d'analyse qualitative")

Le comportement du système radiculaire pendant la période de végétation qui a duré une cinquantaine de jours nous a montré que l'ion Ca++ lui-même n'avait aucune influence sur la phytotoxicité du cuivre.

Etant distribué à la même dose, soit 4 m.éq./kg de terre, dans tous les pots ayant reçu un amendement calcique, nous devrions constater un développement radiculaire comparable dans chacun d'eux. La photo n° 7, représentant l'état des plantules à la fin de l'expérience, nous montre qu'il en est différemment.

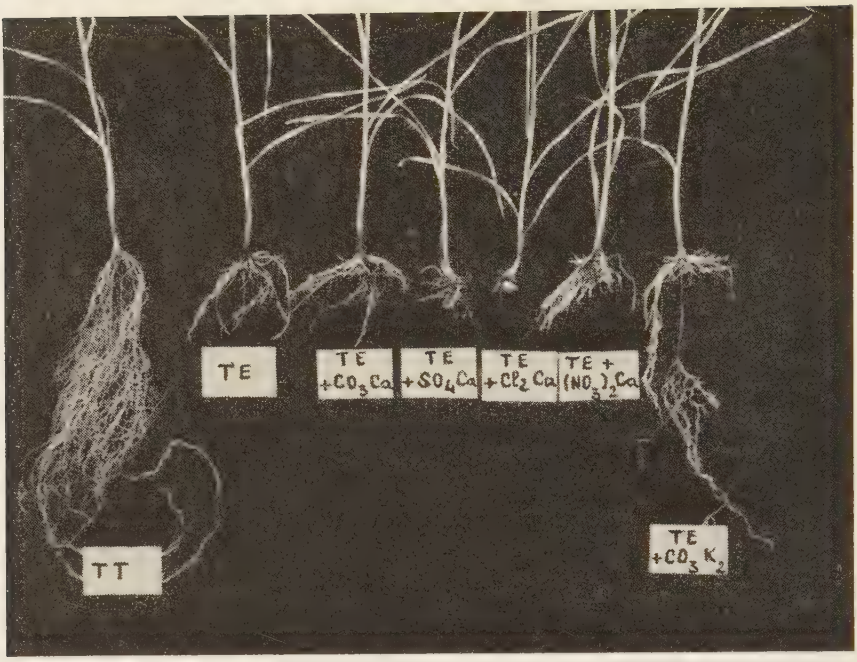


PHOTO N° 7.

Influence sur le développement radiculaire
de divers sels de calcium apportés au sol TE.

Le développement du système radiculaire des plantules du pot n° 3 (TE + CO_3Ca) présente une légère amélioration par rapport à celui du pot n° 2 (TE). Le rabougrissement des racines s'accentue dans les pots 4 et 5 (TE + SO_4Ca et TE + Cl_2Ca), il est un peu moins accusé dans le pot n° 6 ayant reçu du $(NO_3)_2Ca$. Par contre, l'apport de CO_3K_2 a augmenté légèrement le développement radiculaire.

La mesure du pH dans chacun des sept pots, à l'issue de l'expérience, nous a donné les résultats mentionnés dans le tableau X.

TABLEAU X

Influence de divers sels sur le pH du sol

N° DES POTS	TYPE DE TERRE UTILISÉE	AMENDEMENT REÇU		PH APRÈS 50 JOURS
		Nature	Dose en m.éq./kg	
1	TT	—	—	6,7
2	TE	—	—	4,6
3	TE	CO_3Ca	4	5,2
4	TE	SO_4Ca	4	4,3
5	TE	Cl_2Ca	4	4,3
6	TE	$(NO_3)_2Ca$	4	4,45
7	TE	CO_3K_2	4	5,4

Les sels de calcium qui proviennent d'acides forts entièrement dissociés ont abaissé le pH du sol et provoqué ainsi un accroissement du taux de cuivre mobile, se traduisant sur la plante par l'accentuation des symptômes de toxicité cuprique.

La relation entre l'acidité du sol et l'intensité des phénomènes de rabougrissement du système radiculaire est nette. Pour un même taux de cuivre total, les symptômes de toxicité sont d'autant plus accusés que le sol est plus acide.

D'ailleurs, un autre essai, un peu brutal du point de vue agronomique mais indiquant cependant le sens des phénomènes consiste à apporter au sol TE des ions H^+ sous forme de ClH et des ions OH^- sous forme de NaOH à la dose de 20 m.éq./kg de terre. Dans le premier cas, les ions H^+ ont provoqué une atrophie complète du système radiculaire, tandis que dans le deuxième cas, les ions OH^- ont permis un développement des racines supérieur à celui obtenu dans TE.

Il faut donc admettre que l'acidité est un facteur déterminant pour l'apparition de la toxicité cuprique.

Il est vraisemblable que son action ne modifie pas seulement les propriétés chimiques du sol, mais que son influence se fait également sentir sur la physiologie de la plante. C'est là un autre aspect du problème qui sort du cadre de notre étude.

D'autres facteurs peuvent également intervenir plus ou moins directement dans l'apparition de ces accidents. C'est ainsi que ces terres acides, riches en cuivre, ont vraisemblablement une microflore spéciale, adaptée aux conditions particulières du milieu, dont l'incidence sur l'évolution générale des constituants du sol, notamment de la matière organique, reste encore assez mal connue.

EXPÉRIMENTATION AU CHAMP

Dans les essais de culture conduits au laboratoire ou en serre, certains facteurs tels que température, humidité, éclairement sont différents de ceux enregistrés en pleine nature. Plus généralement, on peut affirmer que les conditions du milieu naturel ne sont jamais strictement respectées.

D'autre part, si nous considérons le sol lui-même, utilisé dans les essais de cultures en pots, par exemple, nous sommes obligés de constater que les traitements qu'il a subis au cours de sa préparation, séchage, émiettement lors du passage au tamis à mailles de 2 mm, conservation plus ou moins prolongée à l'état sec, etc., ont pu amener des changements notables dans ses propriétés physiques et chimiques, notamment en ce qui concerne les éléments colloïdaux ou paracolloïdaux. Le séchage peut provoquer, par exemple, des phénomènes de vieillissement dans les éléments

argileux ou plus généralement dans les colloïdes organo-minéraux, se traduisant par des modifications plus ou moins irréversibles de l'activité de certains ions ou des changements dans la position ou la nature des sites réactionnels.

L'arrêt, ou tout au moins le ralentissement de l'activité biologique, peut amener des perturbations dont on ignore les conséquences.

Pour toutes ces raisons, nous nous sommes préoccupés, dès le début de nos recherches de vérifier les résultats obtenus au laboratoire ou en serre par des essais effectués en plein champ sur les lieux mêmes ou les accidents précédemment décrits étaient observés.

Description du dispositif expérimental et résultats

Les essais effectués ont porté sur la parcelle TE du domaine de Monlon, décrite au début de ce travail. Les emplacements choisis correspondent aux plages les plus stériles; l'un A est situé sur la pente raccordant les deux terrasses près du prélèvement noté 1 sur la figure 1, l'autre B se trouve sur la partie horizontale non loin du prélèvement n° 3.

La photo n° 8 représente l'ensemble B. Les parcelles ayant reçu des sels hygroscopiques tels que Cl_2Mg ou ClK se détachent des autres par leur teinte plus sombre, due à un supplément d'humidité.

Chaque série comporte 15 parcelles de 1,5×1 m séparées par une bande de 0,4 m de large, distribuées de la façon suivante :

Parcelle n° 1 :

T - Témoin sans traitements.

Parcelle n° 2 :

CO_3Ca (I), traitée par du CO_3Ca « pur précipité » à la dose (I), soit 750 kg/ha.

Parcelle n° 3 :

CO_3Ca (II) dose (II) soit 3 000 kg/ha.

Parcelle n° 4 :

SO_4Ca - traitée à la dose de 1 290 kg/ha de produit pur.

Parcelle n° 5 :

ClK (I) à la dose (I) soit 225 kg/ha.

CO_3Ca (I).

Parcelle n° 6 :

T - Témoin.

Parcelle n° 7 :

ClK (II) à la dose (II) soit 900 kg/ha.

CO_3Ca (II).

Photo n° 8.
Ensemble B des parcelles expérimentales de Monlon.

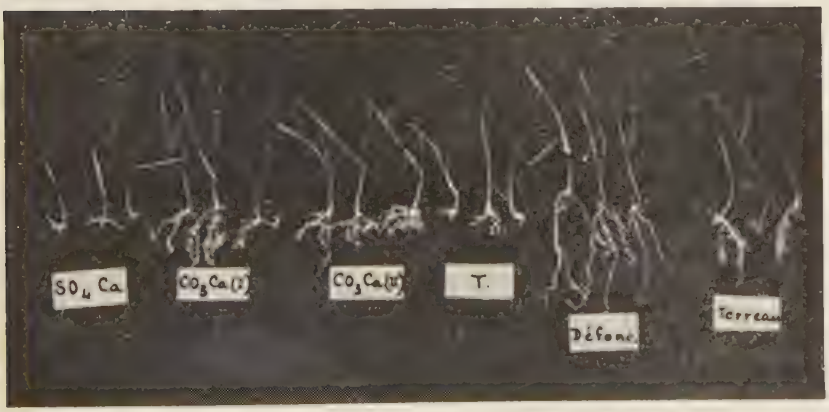


Photo n° 9.
Aspect des plantules de blé, trois semaines après le semis, dans les différentes parcelles de l'essai au champ.

Parcelle n° 8 :
CO_3Ca (I).
ClK (II).

Parcelle n° 9 :
CO_3Ca (II).
ClK (I).

Parcelle n° 10 :
CO_3Ca (I).
Cl_2Mg à la dose de 580 kg/ha.

Parcelle n° 11 :
T - Témoin.

Parcelle n° 12 :
CO_3Ca (I).
ClK (II).
Cl_2Mg.

Parcelle n° 13 :
CO_3Ca (I).
ClK (I).
Cl_2Mg.

Parcelle n° 14 :
Parcelle n'ayant reçu aucun apport, mais dont la couche arable 0-20 cm a été enfouie à 55 cm de profondeur et remplacée par la terre provenant du sous-sol 20 à 55 cm. Ceci correspond sensiblement au résultat donné par un défrichement ou un labour profond à 60 cm.

Parcelle n° 15 :
Parcelle ayant reçu du terreau à la dose de 200 à 300 t/ha mélangé à la couche de surface 0-10 cm, plus du CO_3Ca à la dose (I).

Les premiers essais de culture en pots, sur la terre TE, montraient un déséquilibre dans l'alimentation minérale du blé. Nous l'avions alors attribué à une carence potassique ou à un déséquilibre Ca/Mg. C'est ce qui justifie l'importance accordée à ces questions lors de l'élaboration du dispositif expérimental. Cette étude est sans intérêt au stade actuel de notre travail. Les petits accidents causés par une carence en K ou en déséquilibre Ca/Mg sont secondaires : ils peuvent d'ailleurs provenir de l'état déficient de la plante. La cause première de la quasi-stérilité de ces sols provient, comme nous l'avons démontré, de l'excès de cuivre, ce que nous ignorions lors de la mise en route de cette expérience. Dans ce qui suit, nous ne considèrerons donc pas les parcelles consacrées uniquement à l'étude de la carence en K ou de l'équilibre Ca/Mg.

Les parcelles sont ensemencées avec du blé alternatif, variété « Blé d'Avril », le 25 février 1957. Au bout d'une douzaine de jours, on assiste à un début de levée, apparemment normal, indiquant une germination convenable dans toutes les parcelles.

Trois semaines après le semis, alors que les plantules sont arrivées au stade 2 feuilles, on peut déjà apercevoir des différences entre les traitements. Comme en témoigne la photo n° 9 sur laquelle sont représentées, de gauche à droite, à raison de 3 pieds par parcelle, les plantules provenant des parcelles n° 4, 2, 3, 1, 14, 15 correspondant aux traitements suivants : SO_4Ca - CO_3Ca (I) - CO_3Ca (II) - Témoin - Défoncement - Terreau + CO_3Ca (I) ; le développement du système radiculaire dans la parcelle traitée avec SO_4Ca est comparable à celui observé dans la parcelle témoin T. Il est légèrement amélioré dans les parcelles 2 et 3 traitées par CO_3Ca (I) et CO_3Ca (II) sans pouvoir toutefois déceler des différences sensibles entre les deux doses de carbonates.

Dans la parcelle 14, les racines, qui explorent encore la couche de terre remontée en surface par le défoncement et provenant de 20 à 55 cm de profondeur, se développent à peu près normalement.

Dans la parcelle 15, ayant reçu en plus de CO_3Ca (1), du terreau, le système radiculaire, bien qu'ayant une certaine importance, est cependant moins développé que dans la parcelle précédente. De plus, on y remarque, outre une certaine irrégularité d'une plantule à l'autre, chez certaines il est très réduit, la présence sur la même plantule d'un chevelu racinaire normal, à côté de racines renflées et courtes. Ces particularités vont s'accentuer au fur et à mesure de la croissance des plantes.

Un autre prélèvement, effectué environ 3 mois après le semis montre, voir photo n° 10, que la dose (II) de CO_3Ca a augmenté de façon notable le développement radiculaire par rapport à la dose I. L'effet du SO_4Ca est nul.

Le système radiculaire s'est normalement développé dans la parcelle 14, tant qu'il explorait la couche de terre remontée du sous-sol, mais dès que les racines atteignent, aux environs de 35-40 cm de profondeur la couche de terre qui constituait autrefois le sol, elles s'épaississent et cessent de s'allonger.

Dans la parcelle 15, ayant reçu du terreau + CO_3Ca (I), nous retrouvons ce que nous avions constaté lors du premier prélèvement, à savoir, une grande irrégularité dans le développement du système radiculaire. Certains comme celui représenté sur la photo n° 10 sont bien développés, la part de racines atrophiées est faible. D'autres, au contraire, voir photo n° 11, présentent une partie atrophiée, le reste étant à peu près normal. L'observation attentive, de la position de ces deux types de racine dans la motte de terre, permet de justifier ce dimorphisme. L'apport de terreau à la couche de terre superficielle (0-10 cm) n'a pas donné par un léger béchage, un mélange

PHOTO N° 10.

Aspect du système radiculaire 3 mois après le semis. De gauche à droite sont représentés les plantules provenant des traitements suivants : (1) Témoin - (2) CO_3Ca (I) - (3) CO_3Ca (II) - (4) SO_4Ca - (14) Défoncement - (15) Terreau + CO_3Ca (I).

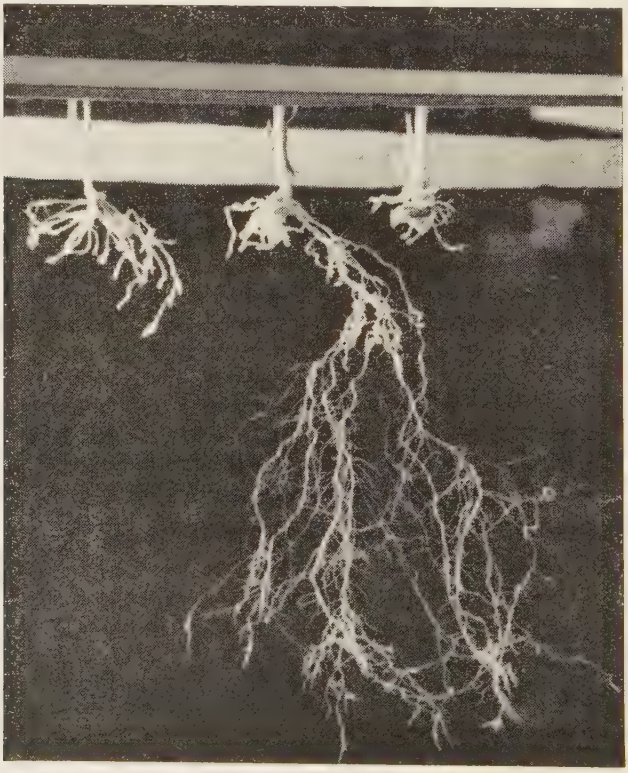


PHOTO N° 11.

Au centre, aspect du système radiculaire d'une plantule provenant de la parcelle (15) Terreau + CO_3Ca (I). De chaque côté, aspect radiculaire des plantules provenant des parcelles témoins.

intime et homogène des deux constituants. Des mottes de terre plus ou moins grosses ont été conservées, ainsi s'expliquent les irrégularités constatées d'une plantule à l'autre, et même sur une même plantule. Les racines ayant l'aspect sain cheminent dans une zone riche en terreau et celles qui présentent des caractères maladifs, se trouvent dans une partie non amendée.

Des différents traitements, c'est la parcelle correspondant à un labour profond ou défoncement qui a donné sans conteste les meilleurs résultats. Le blé, à l'épiaison, atteignait environ 70 cm. Il a donné une récolte faible, mais appréciable étant donné l'extrême pauvreté de ce sol.

La parcelle 15 amendée par du terreau a donné des résultats intéressants, mais inférieurs à ceux de la parcelle précédente.

Les parcelles traitées par CO_3Ca ont amorcé un début de montaison, mais les plantules sont restées grêles et squelettiques et ont donné une maigre récolte, même avec la dose II de CO_3Ca.

Dans les parcelles témoins, les plantules de blé n'ont pas résisté aux premières chaleurs estivales et, fin juin, on ne trouvait plus trace de végétation. Il en était de même des parcelles ayant reçu du SO_4Ca.

Dans une parcelle, de dimensions plus grandes que les autres, nous avons observé le comportement sur cette terre riche en cuivre d'une douzaine de plantes cultivées : avoine (Noire de Magencourt) - seigle - luzerne - vesces de Cerdagne - vesces de Narbonne - sarrasin de Tartarie - sarrasin argenté - colza - soja - ricin et trois variétés de Lupin - (Lupin blanc - Lupin bleu - Lupin jaune).

Malgré quelques différences dans leur capacité de résistance au cuivre, toutes ont été très fortement affectées. Il n'a pas été possible de retenir l'une d'entr'elles pour coloniser ces types des sols.

CHAPITRE VII

PROJETS DE RESTAURATION DES SOLS DÉGRADÉS RICHES EN CUIVRE ASSIMILABLE RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Les résultats des essais effectués au champ confirment ceux obtenus au laboratoire ou en serre par d'autres méthodes et permettent de tirer les conclusions pratiques suivantes :

1° La migration du cuivre dans le sol en place est très lente. Il s'accumule pour sa majeure partie dans la couche arable qu'il rend stérile dans les types de sols envisagés;

2° L'influence du pH est déterminante. La toxicité n'apparaît que pour un pH inférieur à 5,5. En saturant l'acidité du sol, on diminue donc la toxicité du cuivre pour la plante.

Ces constatations sont à la base des remèdes que nous proposons pour la récupération de ces sols. L'établissement d'une rotation normale de culture ne pourra se faire qu'après avoir supprimé ou tout au moins considérablement amoindri la toxicité du cuivre et rétabli un niveau de fertilité convenable.

La toxicité cuprique se manifestant essentiellement dans les sols acides, la première opération consistera à relever le pH. Dans les types de sols que nous avons décrits, à faible pouvoir tampon, un apport de 3 à 4 t de chaux/ha suffit pour amener théoriquement le pH aux environs de 7.

Un essai, effectué au laboratoire à partir de trois types d'amendements :

1° Calcaire pulvérulent,

2° Calcaire pulvérulent en présence de SO_4Ca,

3° Amendement calcique à base de calcaire et de chaux,

nous a donné après trois jours, alors que le pH était stabilisé, les valeurs suivantes :

7 pour le premier cas, 7,1 pour le second et 6,6 pour le troisième. Les doses utilisées correspondent à 3 t/ha de calcaire pur.

L'apport du mélange calcaire + SO_4Ca a cependant donné des résultats plus intéressants, notamment en ce qui concerne la flocu-

lation des colloïdes argileux. Le SO_4Ca agit à la façon d'un catalyseur. Il favorise la saturation des acides alumino-siliciques en élevant le taux de Ca^{++} en solution.

Dans les opérations de restauration pratique de ces sols, un apport de 3 à 4 t/ha de chaux ou d'un mélange chaux-calcaire s'impose donc en premier lieu. Ainsi l'acidité de la couche arable, tout au moins momentanément, sera-t-elle neutralisée. C'est là bien sûr, une quantité insuffisante pour assurer une récalcification durable. En effet,, une partie de l'amendement sera entraîné vers la profondeur et servira à neutraliser l'acidité des couches plus profondes; une autre partie sera éliminée par lessivage. C'est pourquoi des opérations de récalcification devront être renouvelées fréquemment jusqu'à ce que le sol ait atteint un état d'équilibre convenable.

Si le premier apport doit être effectué sous forme de chaux pour que son action soit immédiate, les apports ultérieurs se feront avec profit sous forme de calcaire broyé, dont l'action, plus lente mais moins brutale, se fera sentir longtemps. De plus, la récalcification pourra aller de pair avec les autres opérations de restauration notamment la reconstitution du stock de matière organique.

La neutralisation de l'acidité ayant diminué considérablement l'activité du cuivre concentré dans la couche superficielle, un labour profond, descendant à 60 cm ou plus, permettrait en même temps que la remontée en surface d'une terre contenant peu de cuivre, la diffusion dans la masse des couches superficielles enrichies en cet élément. La remontée en surface du sous-sol nécessitera évidemment la reconstitution du stock de matière organique et demandera quelque temps pour que l'activité des micro-organismes prenne un certain développement.

Ce défoncement n'est pas toujours possible. Sur les sols de terrasses, la couche de grepp vient parfois très près de la surface et ne permet pas d'envisager une telle opération. D'autre part, et ceci est assez fréquent, il peut arriver que le sous-sol renferme un banc de galets ou de graviers qu'il serait inopportun de remonter en surface. Du point de vue économique, un tel défoncement réclame une mise de fonds importante.

Quand on se trouve dans l'impossibilité de réaliser ce défoncement un soin particulier sera apporté aux opérations de récalcification et de restauration des propriétés chimiques et physiques.

Le marnage, dans tous les cas où il est économiquement réalisable, est une opération particulièrement indiquée, sur ce type de sol. L'apport d'argile améliore la structure et augmente la capacité d'échange.

Les opérations de chaulage et de récalcification peuvent amener un déséquilibre du rapport Ca/Mg. Un apport de calcaires magnésiens serait une opération bénéfique dans ce cas.

Une étude sur certaines carences possibles en oligo-éléments pourrait être envisagée dans ces sols particuliers.

L'activité des micro-organismes doit, elle aussi, présenter des particularités qu'il serait intéressant de préciser.

Après avoir rendu le milieu minéral du sol apte à assurer aux plantes les conditions minimum nécessaires à leur développement, on se préoccupera de lui donner un taux d'humus et de matière organique convenable par un apport massif de fumier de ferme, toutes les fois que cela sera possible, et par l'établissement d'une végétation de couverture peu exigeante qui sera enfouie comme engrais vert.

Ce n'est qu'après avoir apporté toutes ces améliorations que l'on pourra faire entrer la parcelle dans une rotation normale par l'établissement d'une culture de légumineuses précédée d'une forte fumure minérale de fond.

Les techniques proposées ont été expérimentées à Monlon sur des parcelles issues du défrichement de vieilles vignes et présentant une toxicité cuprique marquée.

Dans l'une d'elles, située sur la IV terrasse, on a enfoui par un labour, 60 t/ha de fumier de ferme. La récalcification a été assurée par incorporation au sol, au moyen de disques, de 3 t/ha de calcaire broyé très fin, en provenance de Lannemezan. Avant le semis d'un mélange Vesce de Cerdagne-Orge, la fumure a été complétée par un apport de 800 kg/ha de scories potassiques titrant 12 % de K_2O et 12 % de P_2O_5. A la levée, on apporte 20 unités d'azote/ha.

Le développement du mélange vesces-orge s'est poursuivi convenablement en donnant une couverture végétale appréciable qu'on a pu enfouir comme engrais vert au cours de l'été.

Sur une zone-témoin, n'ayant reçu aucun amendement, la végétation n'a pu s'implanter, laissant un sol entièrement nu. Ceci montre l'efficacité des remèdes proposés.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Les difficultés de remise en culture des sols provenant du défrichement de vieux vignobles établis sur des alluvions récentes sont connues depuis fort longtemps par les agriculteurs de la région. C'est après s'être heurtés à ces mêmes difficultés sur une parcelle du domaine expérimental de l'E.N.S. Agronomique, à Monlon, que nous avons été amenés à étudier ce problème.

Nous avons vu, au cours du chapitre premier de ce travail, quel était le comportement des plantes dans ces sols, rendus pratiquement stériles. Les symptômes, caractéristiques de ces accidents, portent essentiellement sur le système radiculaire dont l'atrophie est particulièrement spectaculaire. Les organes aériens semblent peu

touchés : on observe seulement un retard et un nanisme dans le développement, mais ces observations ne sont guère possibles dans les premiers stades suivant la germination.

Dans le chapitre II après un aperçu géographique et pédologique des sols sur lesquels se rencontrent ces accidents, nous avons entrepris l'étude détaillée de la parcelle TE qui a servi de base à notre travail. Nous avons montré que le lessivage, accéléré par les méthodes de culture de la vigne, apports de soufre notamment, aboutit dans ces types de sols à un état de dégradation avancé : réduction extrême des bases déplaçables, capacité d'échange très faible, acidité élevée. Cette dégradation ne s'est pas limitée à la zone travaillée, mais affecte aussi le sous-sol.

D'autres observations, effectuées dans les vallées de la Garonne et de ses affluents, nous ont montré l'importance des surfaces qui sont susceptibles de subir ces phénomènes de dégradation.

Le chapitre III est consacré exclusivement aux méthodes et techniques de dosage du cuivre, en raison des difficultés rencontrées dans ce microdosage.

Après avoir envisagé, dans le chapitre IV, les différentes causes de stérilité de ces sols, le cuivre semble en être le principal responsable. L'étude de son comportement dans le sol montre qu'une fraction importante s'y trouve sous une forme « facilement déplaçable ». La plante réagit à cet excès de cuivre par une atrophie de son système radiculaire d'autant plus marquée que le sol est plus riche en cuivre « déplaçable ».

Le dosage de cet élément dans la plante met en évidence son accumulation au niveau des racines et son absence de migration à l'intérieur du végétal.

La démonstration proprement dite de sa phytotoxicité, qui fait l'objet du chapitre V, était difficile à réaliser sur le sol complet. C'est pourquoi, après avoir montré que la solution du sol obtenue d'après la méthode de Schloesing reproduisait sur la plante, au cours des premiers stades germinatifs, les mêmes symptômes de toxicité que le sol, nous avons fait une série d'essais de culture en milieu liquide en faisant varier le taux de cuivre en solution, soit par des apports de cet élément dans l'eau distillée, soit par dilutions de la solution du sol, soit encore par des prélèvements sélectifs de cuivre dans cette dernière. Dans les trois cas, nous avons vérifié que l'action dépressive du cuivre est similaire et qu'elle devient notable dès que sa concentration dans la solution atteint ou dépasse 1 mg/l.

Les conditions pour que les types de sols envisagés présentent cette toxicité cuprique sont d'une part, un taux de cuivre total suffisant, d'autre part et surtout, un pH inférieur à 5.

Une expérimentation au champ a permis, en même temps que le contrôle des résultats acquis au laboratoire, de déterminer les moda-

lités de remise en culture de ces sols. Les opérations de restauration consisteront d'abord à ramener le pH aux environs de la neutralité pour réduire au minimum la mobilité du cuivre et par suite sa toxicité; ce n'est qu'après cette opération que l'on s'occupera de reconstituer le potentiel de fertilité par les amendements organiques et minéraux appropriés.

Nous avons proposé quelques remèdes simples pour rendre une certaine fertilité à ces sols dont la composition minéralogique ne permet pas d'espérer une régénération naturelle avec le temps, d'autres peuvent être cherchés. Mais, et c'est le plus important, sachant à quel état de dégradation peuvent aboutir des méthodes de cultures abusives, on préviendra de tels accidents, soit en adaptant ou en modifiant le cas échéant les cultures, soit par des apports d'éléments susceptibles de maintenir le sol en bon état d'équilibre.

Par exemple, la présence d'un certain taux de carbonates évitera son acidification à la suite des apports répétés de soufre lors de la lutte contre l'oïdium de la vigne.

Dans les vignobles, le sol constamment dépourvu de toute végétation qui créerait un microclimat humide favorable au développement du mildiou, est d'une grande pauvreté en matière organique ce qui contribue à rendre son équilibre précaire. On se préoccupera donc avec profit, par des apports de fumier ou par tout autre moyen, de rétablir un taux de matière organique convenable.

L'agriculteur averti suivra avec profit l'évolution de ses sols. Il sera ainsi en mesure de remédier préventivement à tout déséquilibre et maintiendra « ses terres » en bon état de fertilité.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Viala (P.). — De l'action de certaines substances toxiques sur la vigne. *Revue de Viticulture*, t. I, 1894.

[2] Girard (A.). — Sur l'accumulation dans le sol des composés cuivriques employés pour combattre les maladies parasitaires des plantes. *C.R.Ac. Sc.*, t. CXX, p. 1147-, 1895.

[3] Rives (L.). — Sur un cas de fatigue du sol. La maladie des céréales semées sur défrichement du sol. *Journal d'Agriculture pratique*, n° 51, p. 491, 1928.

[4] Drouineau et Mazoyer (M^lle). — Toxicité du cuivre dans les sols. VI^e Cong. Int. Sc. Sol IV, Paris, 1956.

[5] Depardon (L.) et Buron (P.). — Cultures agricoles sur défrichement de vigne. *Ann. Agro.*, I, 1955, p. 161.

[6] Denizot (G.). — Terrasses alluviales du bassin de la Garonne en amont de Toulouse. Bull. *de la Section de Géographie*, 1922 (Congrès des Sociétés Savantes).

[7] Liwerant (J.). — Les sols d'alluvions de la vallée de la Garonne. *Ann. Agro.* mai-juin 1939.

[8] Nikolitch (S.). — Recherches chimiques sur les sols podzolisés. Leur amélioration. Thèse d'Université, Toulouse, 1930.

[9] Girod (J.) et Lacroix (J.). — Evaluation des bases déplaçables et de la capacité d'échange des sols. *Ann. Ec. Nat. Sup. Agro.*, t. VI, fasc. I.

[10] Charlot (G.) et Bézier (D.). — Analyse quantitative minérale. 3^e éd., Masson, 1955, Paris.

[11] Girod (J.) et Lacroix (J.). — Evaluation du calcium et du magnésium échangeables des sols au moyen d'E.D.T.A. *Ann. Ec. Nat. Sup. Agro.*, t. VI, fasc. I.

[12] Girod (J.) et Lacroix (J.). — Influence de l'acidité sur les mouvements de l'aluminium dans un mélange d'argiles. *C.R.Ac. Sc.*, t. 250, 1960.

[13] Lacroix (J.). — Contribution à l'étude des déplacements réciproques des ions calcium et des ions potassium dans des sites réactionnels déterminés d'un sol. *Ann. Ec. Nat. Sup. Agro.*, t. VII, fasc. I.

[14] Charlot (G.). — Théorie et méthode nouvelle d'analyse qualitative. 3^e éd., 1949, Masson, Paris.

[15] Duval (C.). — Méthodes modernes d'analyse qualitative, 1^re éd., 1955, Paris. Extrait du volume « Constantes » de « techniques de l'ingénieur ».

[16] Loiseleur (J.). — Techniques de Laboratoire, 2^e éd., 1954, Masson, Paris.

[17] André (L.). — Observations préliminaires sur les phénomènes de phytotoxicité dus à l'accumulation du cuivre dans certains sols cultivés. *Bull. Soc. Fse Physio. Vég.*, t. 5, n° 2, mai 1959.

[18] Demolon (A.). — Dynamique du sol, 5^e éd., 1952, Dunod, Paris.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION. 5

CHAPITRE PREMIER : Comportement des plantes après défrichement de vieilles vignes. 9

CHAPITRE II : Etude physico-chimique des sols dégradés. 15

Etude du terrain expérimental TE. 18

Autres observations. 28

CHAPITRE III : Méthodes et techniques de dosage du cuivre. 33

CHAPITRE IV. 41

I. Comportement du cuivre dans le sol. 44

II. Etude de son influence sur la biologie de la plante. . . . 45

CHAPITRE V : Démonstration de la toxicité du cuivre. 53

CHAPITRE VI :

I. Conditions de la phytotoxicité du cuivre. 65

II. Expérimentation au champ. 69

CHAPITRE VII : Projets de restauration des sols dégradés riches en cuivre assimilable. 77

RÉSUMÉ ET CONCLUSION. 79